

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV GEOTECHNIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF GEOTECHNICS

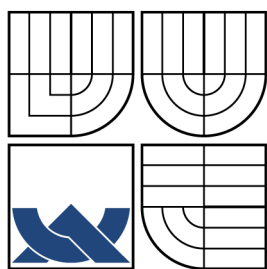
VYUŽITÍ PENETRAČNÍCH ZKOUŠEK PŘI NÁVRHU  
PILOTOVÝCH ZÁKLADŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

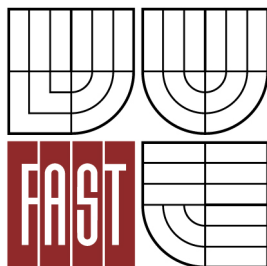
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

PAVEL KOUDELA

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV GEOTECHNIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF GEOTECHNICS

# VYUŽITÍ PENETRAČNÍCH ZKOUŠEK PŘI NÁVRHU PILOTOVÝCH ZÁKLADŮ

PILE DESIGN BASED ON PENETRATION TESTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

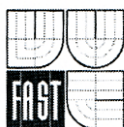
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

PAVEL KOUDELA

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. JAN ŠTEFAŇÁK

BRNO 2016



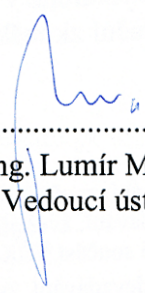
# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav geotechniky

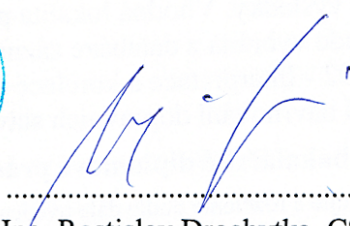
## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Pavel Koudela
<b>Název</b>	Využití penetračních zkoušek při návrhu pilotových základů
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Jan Štefaňák
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2015
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

  
.....  
doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.  
Vedoucí ústavu



  
.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT



### **Podklady a literatura**

ČSN EN ISO 22476-1. Geotechnický průzkum a zkoušení - Terénní zkoušky: Část 1: statická penetrační zkouška s elektrickým snímáním dat a měřením pórového tlaku. Praha: ÚNMZ Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

ČSN EN ISO 22476-2. Geotechnický průzkum a zkoušení - Terénní zkoušky: Část 2: Dynamická penetrační zkouška. Praha: ČNI Český normalizační institut, 2005.

MAYNE, Paul W. GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Cone penetration testing: A Synthesis of Highway Practice. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 2007, 117 p. Synthesis of highway practice, 368. ISBN 03-090-9784-3.

SCHMERTMANN, John. H. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. FHWA-TS-78-209 Guidelines for Cone Penetration Test: Performance and Design. Washington, D.C.: U.S. Department of transportation, 1978.

CAI, Guojun, Songyu LIU, Liyuan TONG a Guangyin DU. Assessment of direct CPT and CPTU methods for predicting the ultimate bearing capacity of single piles. Engineering Geology [online]. 2009, vol. 104, 3-4, s. 211-222

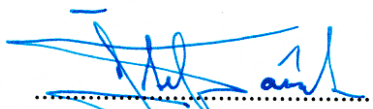
### **Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)**

Cílem práce je provést srovnání výsledků výpočtů standardně používaných v ČR pro návrh a posouzení pilotových základových konstrukcí s výsledky výpočtů založených na penetračních zkouškách pro zvolenou lokalitu, zadanou základovou konstrukci a zadané zatěžovací stavy. Součástí práce bude rešerše dostupné literatury, provedená za účelem seznámení se s principy provádění penetračních zkoušek a vyhledání postupů využívajících pro návrh a posouzení pilot jejich výsledky. Vhodná lokalita pro aplikaci nalezených postupů na konkrétním příkladu bude vybrána z databáze záznamů penetračních zkoušek vytvářené v rámci projektu TA04031092 - Interpretace a korelace dynamické a statické penetrační zkoušky pro efektivnější navrhování dopravních staveb.

### **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Jan Štefaňák  
Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá využitím penetračních zkoušek při návrhu pilotových základů. Hlavním cílem je na základě penetračních zkoušek vypočítat únosnost a sedání osamělých pilot. V práci jsou použity korelační vztahy, u kterých je hledána závislost mezi hodnotami měřenými při penetračních zkouškách a hodnotami smykové pevnosti zemin a indexovými vlastnostmi. Pro porovnání správnosti postupu jsou výpočty únosnosti provedeny dle dříve publikovaných vztahů, za využití softwaru pro výpočet únosnosti piloty z penetrační zkoušky a laboratorních výsledků.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

statické penetrační zkoušky, dynamické penetrační zkoušky, penetrační odpor, plášťové tření, vrtané piloty, hlubinné základy, neogenní jíl, kvarterní hlína, program GEO5, Pilota CPT, korelace, modelová podobnost, laboratorní zkoušky, Robertson, SBT, soil behaviour type.

## **ABSTRACT**

Application of penetration tests at the design of piles foundation is the main subject of this thesis. The main target of this work is calculation of bearing capacity and settlement of single piles. In the thesis are use a new computational relations based on corelation which used relation between penetration values and parameters from laboratory tests. The bearing capacity of the pile is calculation from the derived relations, by the software and laboratory test, too. This types of calculations are executed for comparasion with new computational relations.

## **KEYWORDS**

cone penetration tests, dynamic cone penetration tests, cone resistance, friction sleeve, bored piles, deep foundations, neogene clay, quaternary clay, GEO5 software, Pile CPT, corelation, similitude, laboratory tests, Robertson, SBT, soil behaviour type.

### **Bibliografická citace VŠKP:**

KOUDELA, Pavel. *Využití penetračních zkoušek při návrhu pilotových základů*. Brno, 2016. 59 s., 14 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce Ing. Jan Štefaňák.

## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

Brno .....

.....

Pavel Koudela,  
(podpis autora)

## **Poděkování:**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Štefaňákovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci, dále Ing. Václavu Sadílkovi, Ph.D. za vytvoření databáze penetračních a laboratorních zkoušek a své rodině za podporu ve studiu.



# OBSAH

Úvod	10
<b>1 Statické penetrační zkoušky</b>	<b>11</b>
1.1 Vývoj statické penetrační zkoušky . . . . .	11
1.1.1 Vývoj penetračních hrotů . . . . .	11
1.1.2 Vývoj záznamových zařízení . . . . .	13
1.1.3 Vývoj zatlačecích zařízení . . . . .	13
1.2 Metodika statických penetračních zkoušek . . . . .	15
1.2.1 Pracovní postup . . . . .	15
1.2.2 Unifikace statických penetračních zkoušek . . . . .	16
1.3 Vyhodnocování statických penetračních zkoušek . . . . .	17
1.3.1 Záznam zkoušky . . . . .	17
1.3.2 Určení hloubky jednotlivých vrstev . . . . .	17
1.3.3 Měrný penetrační odpor . . . . .	18
1.3.4 Měrné plášťové tření . . . . .	19
1.3.5 Další hodnoty měřené při penetračních zkouškách . . . . .	19
1.4 Faktory ovlivňující výsledky statických penetračních zkoušek . . . . .	20
1.5 Výpočty fyzikálních, indexových a mechanických vlastností zemin . . . . .	21
1.5.1 Ulehlost nesoudržných zemin . . . . .	21
1.5.2 Pevnostní parametry nesoudržných zemin . . . . .	22
1.5.3 Konzistence soudržných zemin . . . . .	22
1.5.4 Pevnostní parametry soudržných zemin . . . . .	23
<b>2 Dynamické penetrační zkoušky</b>	<b>24</b>
2.1 Vývoj dynamických penetračních zkoušek . . . . .	24
2.2 Postup při vykonávání zkoušky . . . . .	24
2.3 Vlivy na výsledky dynamické penetrace . . . . .	26
2.3.1 Geotechnické vlivy . . . . .	26
2.3.2 Přístrojové vlivy . . . . .	26
2.4 Vyhodnocování dynamických penetračních zkoušek . . . . .	27
2.5 Zjišťování fyzikálních a indexových vlastností . . . . .	28
2.5.1 Stanovení ulehlosti nesoudržných zemin . . . . .	28
2.6 Další použití dynamických penetrací . . . . .	29
<b>3 Pilotové základy</b>	<b>30</b>
3.1 Provádění vrtaných pilot . . . . .	30

<b>4</b>	<b>Návrh pilot na základě penetračních zkoušek</b>	<b>32</b>
4.1	Návrh na základě statických penetračních zkoušek . . . . .	32
4.1.1	Piloty v nesoudržných zeminách (Matys, Ťavoda, Cuninka, 1990) . . . . .	32
4.1.2	Piloty v soudržných zeminách (Matys, Ťavoda, Cuninka, 1990)	33
4.1.3	Využití softwaru pro výpočet únosnosti piloty . . . . .	34
4.2	Návrh na základě dynamických penetračních zkoušek . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Výpočty únosnosti pilot a porovnání přístupů k výpočtům</b>	<b>37</b>
5.1	Výpočty ze statických penetračních zkoušek . . . . .	37
5.1.1	Výpočet dle modelové podobnosti penetrační sondy a piloty .	37
5.1.2	Výpočet únosnosti a sedání piloty z dat penetrační zkoušky . .	38
5.1.3	Výpočet únosnosti a sedání na základě laboratorních zkoušek .	39
5.1.4	Sestavení korelačních vztahů . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>51</b>
	<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>57</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>60</b>
<b>A</b>	<b>Záznam dat ze statické penetrační zkoušky - sonda PS402</b>	<b>61</b>
<b>B</b>	<b>Geotechnická interpretace penetrační sondy</b>	<b>62</b>
<b>C</b>	<b>Protokol GEO5 modul Pilota CPT</b>	<b>63</b>
<b>D</b>	<b>Protokol GEO5 modul Pilota</b>	<b>68</b>

## ÚVOD

Zakládání staveb prodělává neustálý rozvoj. Jak v oblasti zkoušek potřebných pro navrhování základových konstrukcí, konstrukcí pažicích a dalších geotechnických konstrukcí souvisejících se zakládáním staveb, tak v oblasti navrhování těchto konstrukcí. Stále častěji se při navrhování geotechnických konstrukcí dostává do popředí matematické modelování. Vývoj probíhá i v samotných konstrukcích a metodách jejich provádění. V dnešní době je neméně významná časová náročnost stavby a náklady na stavbu. Geotechnické konstrukce a především konstrukce samotného založení stavby tvoří někdy až polovinu z ceny stavby. Požadavky na inženýrsko-geologický průzkum jsou tedy vysoké a mnohdy se zanedbávají, i vzhledem k jeho vysoké ceně. Tím může vznikat plno problémů při realizaci, případně až při užívání konstrukce či stavby.

Vývoj metod zkoušení základové půdy pro geotechnické konstrukce se ubírá směrem, který zrychlí a především zlevní inženýrsko-geologický průzkum. Pro potřeby matematického modelování je důležitá přesná znalost zemního tělesa. Klasický průzkum pomocí vrtných souprav, kterými se provádí jádrové vrty s následným laboratorním zkoušením fyzikálních a mechanických vlastností, jsou nákladné a časově náročné na provádění i samotnou práci v laboratoři, nehledě na jejich bodovou charakteristiku. V některých případech jsou i nepřesné, jelikož se zemina při odběru poruší a není již možné podrobit ji zkoušení v jejím přirozeném uložení. Například pro zjišťování ulehlosti písků je to méně vhodná metoda, právě díky porušení vzorku při odběru.

Penetrační zkoušky zemin a obecně polní zkoušky zemin mají oproti laboratorním zkouškám řadu výhod. Zemina se zkouší ve svém přirozeném uložení, tím pádem je možno zahrnout do výpočtů chování celého zemního masivu. Jsou pohodovější a levnější. Je tedy možno zmapovat podrobněji celé staveniště nebo odhalit proměnnost tloušťek vrstev zemin, například vytvořením geologických profilů.

Pro návrh pilotových základů mají především penetrační zkoušky významné uplatnění. Můžeme se zaměřit na podobnost penetračního hrotu s pilotou, využít této podobnosti a hledat vhodné vztahy pro výpočet únosnosti piloty. Dynamické penetrační zkoušky lze připodobnit k provádění beraněných pilot a tím pádem usoudit na chování těchto pilot při jejich vhánění do zeminy.

Na penetrační zkoušky by měl být brán ohled jako na zkoušky, které mají často pouze lokální platnost. Vhodné je v každé lokalitě, která prošla jiným geologickým vývojem, najít pro hodnoty vycházející z penetračních zkoušek nové odpovídající vztahy pro výpočty fyzikálních, mechanických indexových vlastností zemin.

# 1 STATICKÉ PENETRAČNÍ ZKOUŠKY

Řadí se mezi polní zkoušky zemin a jsou doplňkovou metodou inženýrskogeologického průzkumu. Statické penetrační zkoušky (CPT)<sup>1</sup> jsou založeny na principu zatlačení ocelového hrotu do zeminy konstantní rychlostí a měřením odporů, které tento hrot klade.

## 1.1 Vývoj statické penetrační zkoušky

První zmínky o penetračních zkouškách jsou z Francie kolem roku 1846, kde tuto metodu zkoumal a popsal Alexander Collin. Hlavní vývojový proud se ale soustředil do Holandska, Švédska a Norska. Souběžně však probíhal vývoj v USA, kde roku 1929 uskutečnil první kuželovou zkoušku v píscích Karl von Terzaghi.

Kvazistatická penetrační zkouška (CPT) byla zavedena roku 1932 Barentsenem. V roce 1946 vznikl první ruční mechanický penetrometr s tlačnou kapacitou 25 kN, ve spolupráci Laboratoří mechaniky zemin Delft a N. V. Goudsche Machinefabriek. Roku 1948 zdokonalený přístroj dosahoval tlačné kapacity už 100 kN. První sériově vyráběný penetrometr vybavený elektrickým penetračním hrotem vyrobili v roce 1965 v Holandsku.

### 1.1.1 Vývoj penetračních hrotů

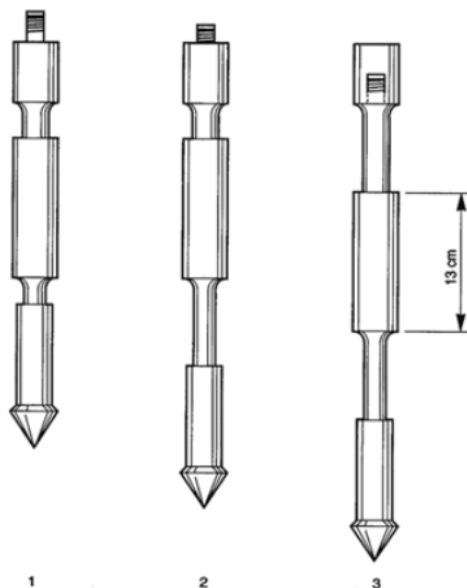
První používaný hrot byl ocelový s průměrem 35,6 mm a vrcholovým úhlem 60°. Zatlačení do země probíhalo ocelovou tyčí, která probíhala v ochranné trubce, s průměrem stejným jako měl hrot.

Na zatlačení hrotu se používal ruční lis a potřebná síla na zatlačení byla měřena na povrchu manometrem z tlaku hydraulické kapaliny. Při zatlačování je riziko vniku zeminy mezi kužel a ochranou trubku. Dodnes se používá hrot s ochranou manžetou, kterou vyvinul Barentsen. Konstrukce penetračních hrotů se dále zlepšovala. Begemann přišel s inovací, kde přibylo třecí pouzdro pro měření odporu na plášti, pro ilustraci na obr.1.1.

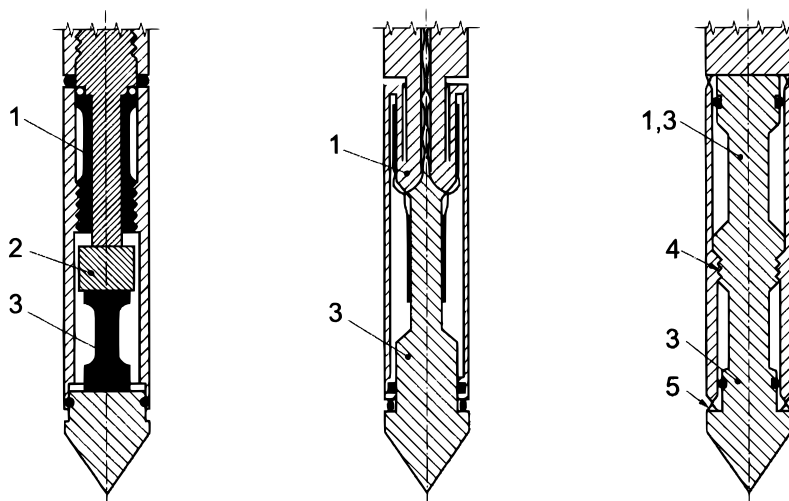
V 50. letech 20. století se vyvinuly elektrické penetrační hroty, které významně posunuly kvalitu statické penetrace. První elektrické penetrační hroty měřily pouze odpor na hrotu. Na hroty se postupem času přidávaly další snímače, které měřily plášťové tření, které je dalším důležitým parametrem, a dále snímače pro zjištění kolmosti sondy, rychlosti vniku, teploty zeminy, pórového tlaku a snímače pro provedení seismic testu. Elektrické penetrační hroty jsou vybaveny snímači přímo ve

<sup>1</sup>Cone penetration test

hrotu a signál ze senzorů je veden na povrch signálním vodičem, kde je v záznamovém zařízení vyhodnocován. Moderní penetrační hroty jsou na obr.1.2.



Obr. 1.1: Hrot se třecí manžetou - typ Begemann



Obr. 1.2: Příklad penetračních hrotů (ČSN EN ISO 22476 - 1)

### 1.1.2 *Vývoj záznamových zařízení*

Současně s vývojem penetračních hrotů bylo potřeba vyvinout záznamová zařízení, která budou naměřené údaje z hrotu zapisovat. Každý typ hrotu potřebuje jiné záznamové nebo vyhodnocovací zařízení. Starší mechanické penetrometry byly vybaveny přesnými manometry a odečet probíhal bodově, v intervalech po dvaceti centimetrech. Tento způsob je méně přesný a náročný na obsluhu penetrometru.

Časem se přešlo na kontinuální záznam zkoušek příslušnými přístroji. S nástupem elektronických hrotů se přešlo převážně na kontinuální záznam. Signál je od hrotu k záznamovému zařízení veden kabelem středem zatlačecích tyčí. Tato metoda vede k okamžitému přehledu o penetračních odporech, či tření na plášti, a poskytuje tak možnost ihned rozhodnout o dalším postupu průzkumných nebo stavebních prací. Současná záznamová technika je zastoupena počítači, kde je zkouška na obrazovkách zobrazována okamžitě ve formě penetračních diagramů. Data z penetračních hrotů jsou odečítána kontinuálně a všechny měřené hodnoty naráz. V záznamových zařízeních lze najít programy, které dle předem daných parametrů a empirických znalostí z penetračních zkoušek dokáží zkoušky ihned vyhodnotit.

Záznamová zařízení se mohou nacházet i v samotném penetračním hrotu. Ten je vybaven pamětovým zařízením, které zaznamenává všechny údaje. Není třeba žádného kabelu pro vedení signálů od snímačů na povrch. Lze použít obyčejné hydraulické zatlačecí zařízení. Paměť v elektronice hrotu je dostatečně velká pro sběr dat z více penetračních sond. Nevýhodou je, že nemáme přehled o naměřených hodnotách přímo při provádění zkoušky. Jediná hodnota, která je dostupná okamžitě, je celkový penetrační tlak zobrazený na manometru zatlačecího zařízení.

### 1.1.3 *Vývoj zatlačecích zařízení*

Vývojem, kterým prošly penetrační hroty, podobně prošly i zatlačecí zařízení. První přístroje byly ruční, vybavené mechanickým zatlačení sondovacích tyčí anebo jednoduchými lisami. Ovládání probíhalo přes soustavu převodů klikou, pro ulehčení práce. Požadavky na větší výkon však přinutily vyvinout zařízení, která jsou schopná dosáhnout větších hloubek a proniknout pevnějšími zeminami. Od ručních lis se přešlo k hydraulickým systémům, doplněných o motory pro pohon čerpadel hydraulické kapaliny, a to jak elektrickými tak spalovacími. Zatlačení zařízení na principu hydraulických systémů se používají dodnes. Příklad současné konstrukce penetrační soupravy je uveden na obr.1.3. Statické penetrometry, se dají rozdělit podle výkonu (tlačné kapacity) na:

- lehké
- střední
- těžké





Obr. 1.3: Moderní penetrační souprava Pagani TG63-150 s tlačnou silou 150 kN  
([www.pagani-geotechnical.com](http://www.pagani-geotechnical.com))

**Lehké penetrometry** jsou nejjednodušší, často i ruční, s tlačnou kapacitou do 40 kN. Jsou malé, lehké a vhodné do těžko přístupných míst.

**Středně těžké penetrometry** se řadí mezi nejuniverzálnější přístroje. Dosahované hloubky penetrace jsou mezi 15 až 20 m při maximální tlačné kapacitě kolem 70 až 120 kN. Vhodné jsou do zemin s většími penetračními odpory (středně ulehle písků, tuhé jíly). Pro montáž těchto typů penetrometrů se používaly přípojné vozíky za terénní automobily. Dnes jsou ve velké míře umístěny na samohybných kolových či pásových podvozcích.

**Těžké penetrometry**, jak napovídá jejich název, disponují velkou tlačnou kapacitou, a to až 300 kN. Největší uplatnění naleznou při penetraci do jílu s pevnou konzistencí, ulehle štěrku a zvětralých poloskalních hornin. Základ těchto penetrometrů tvoří tažené jedno a dvounápravové podvozky nebo podvozky samohybné. Nejtěžší penetrometry jsou umísťovány jako nástavby na velké nákladní automobily.

Všechny výše uvedené penetrometry, které nedisponují dostatečnou hmotností, je třeba před prováděním zkoušky zakotvit. Kotvení se provádí pomocí ručních nebo hydraulických zavrtávacích zařízení, kterými se do země zavrtávají velké talířové kotvy. Problémy při kotvení nastávají v případě, že svrchní vrstvy zemin, ve kterých se provádí penetrace, jsou málo únosné a při větších penetračních tlacích se kotvy vytrhávají. Časová náročnost penetrační zkoušky, při které je potřeba penetračních zařízení kotvit, je další nevýhodou. Pro eliminaci problémů, je lepší nahradit lehčí soupravy, soupravami na těžkých nákladních automobilech, které mají dostatečnou

hmotnost. Umožní se tím zvýšit denní výkon penetračních zkoušek a dosahovat s penetrační sondou do větších hloubek.

## 1.2 Metodika statických penetračních zkoušek

### 1.2.1 *Pracovní postup*

Základním požadavkem kvalitního provedení penetrační zkoušky, je ustavení penetrometru. Důležitá je vzdálenost od dříve vykonaných vrtů a jiných polních zkoušek. Mezi samotnými penetracemi postačí rozestup 2 m, tím se zajistí, že se výsledky nebudou ovlivňovat. Vhodná je vodorovná dostatečně velká plocha. V případě rizika penetrace na navážkách, je důležité provést odkop terénu, z důvodu možného poškození hrotu a nemožnosti dostatečně penetrační soustavu zakotvit.

Soupravy je třeba před vlastní zkouškou ukotvit. Kotvení přístroje se provádí talířovými kotvami. Podle hmotnostní kategorie přístroje se provede dvěma, čtyřmi nebo šesti kotvami. Tím se vytvoří dostatečná protireakce zatlačecím tlakům. Používají se ruční a hydraulické zavrtávací soupravy. Kotvení je důležité z hlediska dosahovaných hloubek, které závisí na maximálních tlacích vyvozených zatlačecím zařízením. Někdy je však i přes dostatečné kotvení nemožné dosáhnout požadovaných hloubek. Nedovolí nám to málo únosné svrchní vrstvy zemin. V těchto případech se zkouška zastaví při vyčerpání protireakce nebo se soupravy přitěžují závažími.

Po řádném ukotvení soupravy je třeba kalibrovat penetrační hrot a jeho snímače. Toto se provádí zatížením a odtížením hrotu společně s nastavením záznamového zařízení. Hrot by měl být volen nejen podle údajů, které potřebujeme zaznamenat, ale i podle jeho přesnosti měření. U hrotu, kterým bude měřen pórový tlak, je třeba nasytit filtr a další části systému měření pórového tlaku. Rozdíl teplot okolního vzduchu a zkoušené zeminy má vliv na snímače v penetračním hrotu. Tím je ovlivněna i přesnost měření. Je třeba nechat penetrační hrot teplotně vyrovnat. Obvykle stačí pár minut pro vyrovnání největšího rozdílu.

Následně se po těchto prvotních krocích započne s penetrací. Hrot se zatlačí do zeminy soustavou tyčí, které se v průběhu penetrace nastavují. Je tedy nutné zkoušku na nezbytně dlouhou dobu přerušit. Jedna tyč měří 1000 mm. Spojení je provedeno šroubovým spojem. Některé penetrační soupravy mají zatlačecí zařízení upraveno pro kontinuální přidávání zatlačecích tyčí. Zkouška se poté nemusí přerušovat.

Při penetrační zkoušce může nastat několik situací, které jsou v rozporu s bezpečným prováděním zkoušky. Pokud jedna z těchto situací nastane, zkouška se přeruší. Tato omezení mají především ochránit penetrační přístroje před poškozením.

Je to například:

- vyčerpání maximální tlačné kapacity zatlačecího zařízení
- překročení maximálního zatížení penetračního hrotu
- překročení maximálního zatížení měřicího systému
- vychýlení penetračního hrotu, nad dovolenou mez od vertikály

Při bezproblémovém provedení penetrační zkoušky a dosažení požadované penetrační hloubky se zatlačecí zařízení přestaví do polohy vytahování a celé soutyčí se vytahuje a postupně rozebírá.

### 1.2.2 *Unifikace statických penetračních zkoušek*

Penetrační zkoušky prodělaly velký rozvoj v několika zemích současně, avšak nezávisle na sobě. Dlouhou dobu nebyly tyto zkoušky sjednoceny a nebyla pro ně předepsána závazná norma. Nebylo možné je tedy porovnávat a obecně používat. Vždy bylo nutné vytvořit pro jednotlivé přístroje a metody specifické korelační vztahy. Používaly se různé průměry a úhly penetračních hrotů a různá rychlost zatlačení penetračního soutyčí.

Výsledkem bylo, v roce 1977 na konferenci Mezinárodní společnosti pro mechaniku zemin a zakládání staveb ISSMGE<sup>2</sup> v Tokiu, představení standardů pro penetrační zkoušky. Doporučení se zabývala jak penetračními hroty, penetračními soupravami tak i záznamovým zařízením a celou metodikou provádění penetračních zkoušek. Základní normové hodnoty byly stanoveny takto:

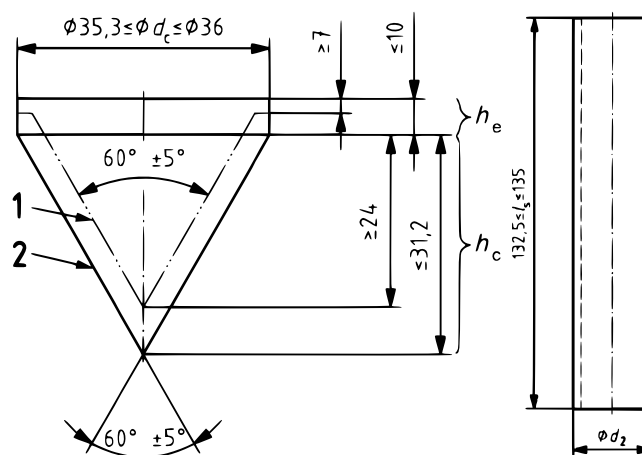
- průměr hrotu 35,7 mm
- průřezová plocha hrotu 1000 mm<sup>2</sup>
- vrcholový úhel hrotu 60°
- manžeta pro měření plášťového tření o ploše 15 000 mm<sup>2</sup>
- rychlost penetrace (20 ± 5) mm/s

Opotřebení hrotu a třecí manžety která nastávají při provádění zkoušek zapříčiňuje změnu rozměrů hrotu. Kontrola těchto rozměrů by měla být provedena před každou penetrací. Dovolené odchylky i základní rozměry dle normy, jsou uvedeny na obr. 1.4.

Tyto hodnoty zůstaly zachovány až do dnešní doby. Pro ČR je závazná norma ČSN EN ISO 22476 - 1<sup>3</sup>, ve které jsou uvedeny tyto a další hodnoty. Je zde popsána i metodika provádění statických penetračních zkoušek.

<sup>2</sup>International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering

<sup>3</sup>ČSN EN ISO 22476 - 1 Geotechnický průzkum a zkoušení - Terénní zkoušky - Část 1: Statická penetrační zkouška s elektrickým snímáním dat a měřením pórového tlaku



Obr. 1.4: Tvar špičky hrotu a manžety s dovolenými odchylkami dle ČSN EN 22476 - 1

### 1.3 Vyhodnocování statických penetračních zkoušek

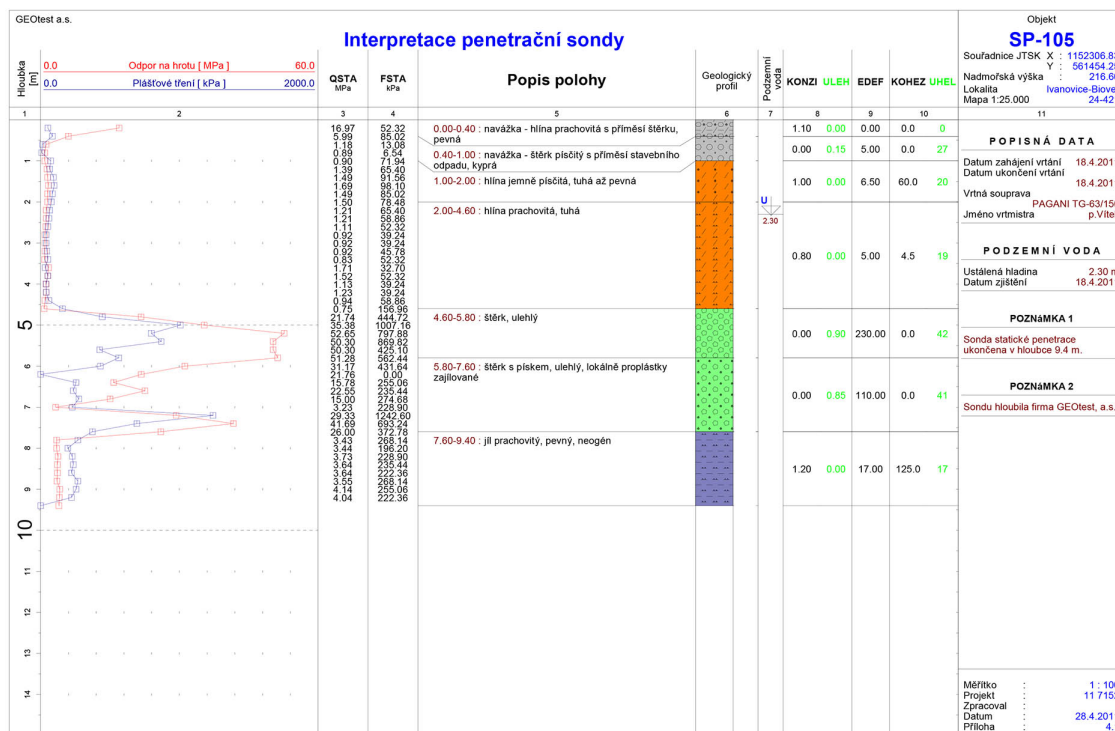
Statická penetrační zkouška, i když dává číselné nebo grafické výsledky, je pro vyhodnocování náročná. Důvodů je několik. Penetrační hrot nevniká do zemin vždy stejně a různé nehomogenity v zeminách mohou zvýšit či snížit penetrační odpor a tím dát základ ke špatnému vyhodnocení zkoušky. I přes počítačové modely, které byly k vyhodnocení vytvořeny, a významně urychlí vyhodnocování, je stále důležitá přítomnost zkušeného inženýrského geologa, který má znalosti o stavbě a formování zemního prostředí. Následující kapitoly jsou pouze úvodem do vyhodnocování statických penetračních zkoušek.

#### 1.3.1 Záznam zkoušky

Záznam penetračních zkoušek (obr. 1.5) je vzhledem k automatickému kontinuálnímu záznamu penetračních odporů a dalších parametrů ihned přístupný k vyhodnocení. Data se zaznamenávají graficky nebo číselně. Grafický záznam je pro vyhodnocení nejvhodnější, jelikož zobrazuje průběh křivky penetračních odporů v závislosti na hloubce. Při správně zvolené citlivosti penetračního hrotu a nastavení záznamového zařízení je křivka velmi podrobná.

#### 1.3.2 Určení hloubky jednotlivých vrstev

Důležitým prvkem v úvodní části je vymezení jednotlivých vrstev. Určování probíhá na základě průběhu křivky penetračního odporu a primárně se nezaměřuje na



Obr. 1.5: Záznam a vyhodnocení statické penetrační zkoušky (GEOTest a.s.)

absolutní hodnoty odporu. Důležité jsou přechody a změny průběhu penetračního odporu, které tvoří méně či více jasné přechody mezi jednotlivými vrstvami. I tak nelze počítat s ostrými přechody, podle kterých by bylo možno určit vrstvy zemín s absolutní jistotou. Mohou vznikat i situace, kdy měkká podložní vrstva je zaznamenána dříve, než do ní hrot vůbec pronikne.

### 1.3.3 Měrný penetrační odpor

Měrný penetrační odpor  $q_c$  se určí z celkového odporu na hrot  $Q_c$  působícího na průřezovou plochu hrotu  $A_c$ .

$$q_c = \frac{Q_c}{A}$$

V této části vyhodnocení zkoušky je třeba se zaměřit na absolutní hodnoty penetračního odporu. Je také důležité mít znalosti o zeminách a intervalech penetračních odporů  $q_c$ , které se u nich mohou vyskytovat. Dále je nutné sledovat rozptyl naměřených hodnot. Velký rozptyl svědčí o nehomogenní vrstvě, kde se střídají různě velká zrna. Jisté výkyvy způsobí i osamělá zrna větších rozměrů, která mohou zastat určitou dobu na penetračním hrotu a tím výsledky ovlivnit. Absolutní hodnoty

penetračního odporu jsou obecně vyšší v píscích, než v soudržných zeminách. Typ zeminy se může určit jednou hodnotou  $q_c$ , ale i dvěma hodnotami, pokud jsou naměřené rozptyly velké. Značí to střídání dvou odlišných typů zeminy, ale jednoznačná hranice mezi nimi nejde určit. Příkladem je hlinitý písek. Měrný penetrační odpor je důležitá hodnota pro určení typu zeminy.

### 1.3.4 *Měrné plášťové tření*

Měrné (lokální) plášťové tření  $f_s$  se určí z celkového odporu  $Q_s$  působícího na třecí manžetu, působícího na její plochu  $A_s$ .

$$f_s = \frac{Q_s}{A}$$

S vývojem penetrační zkoušky vznikla potřeba měřit i plášťové tření  $f_s$ , které je druhým nejpodstatnějším parametrem. Plášťové tření je vhodné pro další a přesnější určení zeminy, anebo pro zjištění tření na plášti piloty. Uplatní se hlavně u zemin kde je odpor na hrotu přibližně stejný a nebylo by možné určit přechod z jedné zeminy do druhé. Měrné plášťové tření vykazuje hodnoty s menším rozptylem, než odpor na hrotu  $q_c$ . První penetrační hroty neměly zařízení pro měření plášťového tření, avšak zjišťovalo se nepřímou z celkového penetračního odporu. Ten se odečítal na manometru zatlačovacího zařízení a po odečtení odporu na hrotu se získala hodnota plášťového tření. Tření však probíhalo na celém zatlačení soustavy a měření tedy nebylo přesné. V současné době měření probíhá třecími manžetami. Tření se snímá pouze na malé ploše a v jednom místě, lze ho tedy nazvat měrné lokální plášťové tření. Třecí manžeta má plochu 15 000 mm<sup>2</sup>. I když je od vlastního penetračního hrotu odsazena, naměřené hodnoty měrného plášťového tření se uvažují pro stejnou hloubku jako  $q_c$ . Plášťové tření společně s penetračním odporem jsou dva parametry, ze kterých lze s velkou přesností zatřídit zeminu. Jsou však nutné předchozí znalosti a studie, které určily jak se hodnoty obou parametrů pohybují pro určité zeminy.

### 1.3.5 *Další hodnoty měřené při penetračních zkouškách*

Moderní elektrické penetrační hroty je možné vybavit dalšími senzory pro měření doplňujících parametrů. Významné je měření pórových tlaků. Inklinometry jsou vhodné pro zjištění kolmosti vniku penetrační sondy, případně se zkouška z důvodu poškození soustavy může při zjištění neobvyklého odklonu přerušit. Tato hodnota se stanovuje pro penetrační sondu jako celek, bez ohledu na vrstvy.



## 1.4 Faktory ovlivňující výsledky statických penetračních zkoušek

Hodnoty, které při penetračních zkouškách měříme, jsou převážně ovlivněny rozměry penetračního soutyčí a metodami provádění penetrace. Tyto parametry je důležité co nejpřesněji dodržovat. Jedině touto cestou je možné výsledky penetračních zkoušek porovnávat a vytvářet obecně platné korelace.

Zmíněné rozměry penetračního soutyčí zahrnují rozměry penetračního zařízení, třecí manžety a zatlačecích tyčí. U hrotu je především rozhodující jeho vrcholový úhel, který však byl v mnohých variantách penetrometrů stejný, ale další části kuželu byly rozdílné. Délka válcové části za hrotem se promítá do tření, které vzniká při pronikání do zeminy, avšak pro tyto aplikace je toto tření nežádoucí. Působí totiž i na hodnoty odporu na hrotu. U třecí manžety bylo sledováno, že výsledky plášťového tření jsou ovlivněny nejen rozměry, ale i umístěním vlastní manžety za hrotem. Vzdálenost od penetračního hrotu má dopad na stav zeminy, která se k hrotu dostane. Při malých vzdálenostech je tření větší, ovlivněné penetračním hrotem, pokud je manžeta ve větší vzdálenosti tření je menší.

Technologie provádění penetrací, tedy pracovní postup a parametry, mají stejný vliv na výsledky jako rozměry a vlastnosti penetračního zařízení. Pracovní postup se do výsledků příliš nepromítne. Jedná se především o přestávky při nastavování zatlačovacích tyčí o další etáž. Prodleva při této technologické pauze však nemá být zbytečně prodlužována. Je ale i výhodná k měření disipace pórových tlaků. Parametry, které jsou při technologii provádění rozhodující jsou rychlost zatlačení penetrační sondy a také její dodržování při celé penetrační zkoušce. Co nejlépe by rychlost měla být konstantní. Samotná rychlost pronikání, může penetrační odpory zvýšit o 50 až 100% a to především v soudržných zeminách. V nesoudržných zeminách pod hladinou podzemní vody však nárůst nebyl sledován. Jako další se zde vyskytuje konstantní rychlost zatlačení. Pokles rychlosti zatlačení se projevuje zejména v zeminách s vyšším penetračním odporem, kde rychlost klesá. Penetrační soupravy jsou vybavovány zařízením, které zvýší zatlačecí sílu, aby se zachovala konstantní rychlost zatlačení. Toto však platí pouze do meze zatlačecí kapacity soupravy.

Samozřejmě penetrační zkoušky ovlivňují i samotné zeminy ve kterých jsou prováděny. Především jejich granulometrie, vlhkost a s tím související konzistence u soudržných zemin, u nesoudržných zemin je to například ulehlost písků. Vliv těchto vlastností bude uveden v další kapitole.

## 1.5 Výpočty fyzikálních, indexových a mechanických vlastností zemin

Výsledky statické penetrace lze použít i pro výpočet fyzikálních a indexových vlastností zemin. Pro tyto potřeby je nutné odvodit korelační vztahy mezi výsledkem penetrační zkoušky, hodnotou odporu na hrotu, a výsledkem laboratorní zkoušky, kterou se zjišťovala potřebná vlastnost zeminy. V následujících kapitolách budou uvedeny poznatky z dřívějších výzkumů zmiňované v Matys, Ťavoda, Cuninka, 1990. Dále budou prezentovány korelační vztahy, sestavené autorem z řady penetračních zkoušek. Všechny závislosti a vztahy jsou platné pro penetrační hrot, který je předepsán normou a pracovní postupy prezentované v normě. Tyto předpoklady jsou důležité pro další využívání výsledků penetračních zkoušek, v lokalitách kde nebyly provedeny korelace s laboratorními výsledky.

### 1.5.1 Ulehlost nesoudržných zemin

Nesoudržné zeminy a hlavně písky jsou vhodným prostředím pro aplikaci penetračních zkoušek. Ulehlost písků ovlivňuje další fyzikálně mechanické vlastnosti. Důležité pro určení ulehlosti je zachovat vzorek v neporušeném stavu. U nesoudržných zemin je problém s odběrem těchto vzorků a následným laboratorním zkoušením. Právě při zjišťování ulehlosti písků, se uplatní výhody statické penetrace. Je to hlavně zkoušení zeminy v jejím původním uložení, kde spolupůsobí i okolní prostředí, což má značný vliv na výsledky.

Tabulka 1.1 je příkladem klasifikace hutnosti písků bez závislosti na zrnitosti avšak největší shodu má se středně zrněnými písky.

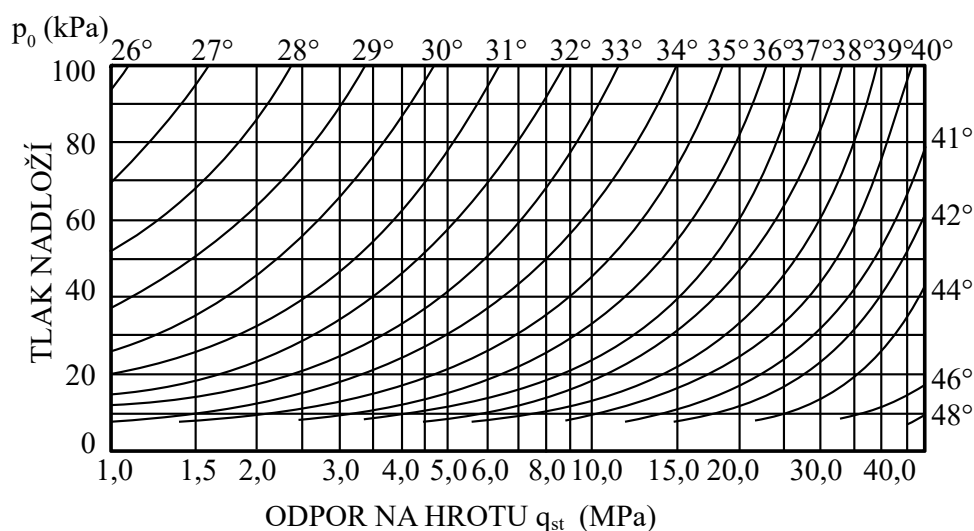
Tab. 1.1: Klasifikace ulehlosti písků dle NGI (Matys, Ťavoda, Cuninka, 1990, s. 52)

Odpor na hrotu $q_c$ (MPa)	Ulehlost	Stupeň ulehlosti $I_D$
<2,5	velmi kyprý	<0,15
2,5 až 5	kyprý	0,15 až 0,35
5,0 až 10,0	středně ulehlý	0,35 až 0,65
10,0 až 20,0	ulehlý	0,65 až 0,85
>20,0	velmi ulehlý	>0,85

### 1.5.2 Pevnostní parametry nesoudržných zemin

U nesoudržných zemin je hlavním parametrem který ovlivňuje jejich pevnost efektivní úhel vnitřního tření  $\varphi_{ef}$ . Při penetračních zkouškách vznikla řada vztahů a klasifikací mezi  $q_c$  a  $\varphi_{ef}$ . Různé klasifikace zavádějí do porovnání řadu dalších vlastností zemin. Jsou jimi tlak nadloží, hutnost písků nebo zrnitost. Pro praktickou aplikaci je nejvýhodnější mít všechny tyto vlastnosti zahrnuté v klasifikaci, ale řada z nich používá pouze jednu či dvě.

Obecná klasifikace podle Jarošenka (obr. 1.6) zahrnuje pouze tlak nadloží. Avšak při porovnání s jinými klasifikacemi vykazuje hodnoty  $\varphi_{ef}$  menší a dostáváme se do oblasti s vyšším stupněm bezpečnosti.



Obr. 1.6: Vztah mezi  $q_c$  a úhlem vnitřního tření písků dle Jarošenka (Matys, Ťavoda, Cuninka, 1990, s. 57)

### 1.5.3 Konzistence soudržných zemin

Konzistence u soudržných zemin má úzkou vazbu s jejich pevností. Čím tužší konzistence tím vyšší pevnost a tím vyšší i odpor na hrotu. Z této posloupnosti se dá usoudit, že mezi  $q_c$  a konzistencí bude přímá závislost. Závislost uvedená v tab. 1.2 je všeobecně použitelná.

Tab. 1.2: Závislost mezi  $q_c$  a konzistencí soudržných zemin dle Švasty  
(Matys, Ťavoda, Cuninka, 1990, s. 53)

Odpor na hrotu $q_c$ (MPa)	Konzistence
0,5	Kašovitá
0,5 až 1,0	Měkká
1,0 až 2,0	Tuhá
2,0 až 4,0	Pevná
>4,0	Tvrdá

#### 1.5.4 *Pevnostní parametry soudržných zemin*

Pevnost soudržných zemin lze charakterizovat totálním úhlem vnitřního tření  $\varphi_u$  a totální soudržností  $c_u$ . Pro zjednodušení se  $\varphi_u$  předpokládá roven nule. V tomto předpokladu vzniká určitá chyba. Jde použít pouze pro plně nasycené jíly a jíly bez příměsí. Závislost mezi  $q_c$  a  $c_u$  se dle Matys, Ťavoda, Cuninka, 1990 a Fugro, 2004 dá vyjádřit jako:

$$c_u = \frac{q_c}{N}$$

kde  $N = (10, 20)$

dále  $N = (17, 18)$  pro nomrálně konsolidované jíly

a  $N = 20$  pro překonsolidované jíly

## 2 DYNAMICKÉ PENETRAČNÍ ZKOUŠKY

Dynamické penetrační zkoušky (DCPT) se liší od statické penetrace metodou vhánění sondovacího soutyčí do zeminy. Ke vnikání do zemin se užívá ráz padajícího závaží. Odpor, který zeminy kladou, se dá určit z potřebného počtu úderů na vniknutí do zeminy o určitou délku.

### 2.1 Vývoj dynamických penetračních zkoušek

Jako předchůdce dynamických penetračních zkoušek lze považovat beraněné testovací piloty používané pro zjištění únosnosti již v 15. století. S myšlenkou dynamické penetrace a prvního beranícího přístroje přišel v 17. století Nicolaus Goldman. V roce 1903 Charles G. Row sestrojil na odebírání vzorků přípravků o průměru 25,4 mm, který se do zeminy vháněl na principu dynamické penetrace. Vývoj probíhal postupně, až Harry Mohr kolem roku 1940 sestrojil penetrometr o průměru 2 palce (asi 51 mm) s přední dutou částí pro odběr vzorků a celá metoda se nazvala Standardní penetrační zkouška (SPT). Jedná se o dynamickou penetraci s výškou pádu beranu 76,2 cm s váhou 63,5 kg. Metoda se rozšířila hlavně v USA a Jižní Americe.

V Československu vznikla norma ČSN 73 1821 Stanovení ulehlosti písků dynamickou penetrační zkouškou, která analyzovala výsledky SPT. Tato metoda se však neujala. Dynamické penetrace prošly vývojem stejně jako statické penetrace. V průběhu času byla rozmanitost přístrojů a metod značná. Dnešní platná norma, která upravuje dynamické penetrační zkoušky je ČSN EN ISO 22476 - 2 Geotechnický průzkum a zkoušení – Terénní zkoušky – Část 2: Dynamická penetrační zkouška. Rozdělení dynamických penetrometrů, základní rozměry dynamického penetrometru a hodnoty pro zarážecí zařízení, které předepisuje tato norma jsou uvedeny v tab. 2.1.

### 2.2 Postup při vykonávání zkoušky

Před vlastní penetrací do zeminy, je nutné provést kontrolu a kalibraci zařízení. Na penetračním soutyčí se kontroluje jeho rovnost, na penetračním hrotu jeho rozměry v povolených mezích. U zarážecího zařízení je třeba zkontrolovat výšku pádu beranu, jeho hmotnost a hladký chod všech mechanismů. U automatických záznamových zařízení se kontroluje jejich správná činnost. Záznamy z kalibrací a kontrol se uchovávají společně se zařízením.

Příprava zkoušky probíhá ustavením a vyrovnaním přístroje. Při ustavování se musí dodržet odklon zarážecího zařízení do 2 % a toto musí platit v celém průběhu

Tab. 2.1: Základní rozměry a hmotnosti pro běžné typy dynamických penetračních přístrojů (ČSN EN ISO 22476 - 2)

<b>Přístroj na dynamickou penetraci</b>	<b>DPL lehká</b>	<b>DPM střední</b>	<b>DPH těžká</b>
Zarážecí zařízení			
hmotnost beranu [kg]	10±0,1	30±0,3	50±0,5
výška pádu [mm]	500±10	500±10	500±10
Kužel			
vrcholový úhel [°]	90	90	90
plocha základny [cm <sup>2</sup> ]	10	15	15
průměr základny [mm]	35,7±0,3	43,7±0,3	43,7±0,3
délka hrotu kužele [mm]	17,9±0,1	21,9±0,1	21,9±0,1
Zarážecí soutyčí			
hmotnost [kg/m]	3	6	6
průměr [mm]	22	32	32

zkoušky. Překročení této hodnoty je důvodem k přerušení zkoušky. Při ustavení přístroje je třeba pamatovat na dostatečnou vzdálenost od budov, pilot, vrtů atd., aby výsledky nebyly ovlivněny.

Dynamická penetrační zkouška probíhá zarážením soutyčí do země. K zarážení se používá beran, který dopadá na kovadlinu. Zarážet se musí vertikálně bez nadměrného ohybu soutyčí. Penetrometr musí do země vnikat plynule. Rychlost beranění se má pohybovat mezi 15 až 30 úderů za minutu. Po každém metru hloubky se musí soutyčí pootočit o 1,5 otáčky nebo dokud není dosaženo maximálního krouťícího momentu. Moment potřebný k pootočení soutyčí se měří a zaznamenává. Při zkouškách typu DPL, DPM, DPH se zaznamenává počet úderů na každých 100 mm penetrace. Běžný počet úderů na vnik od 10 cm je 3 až 50. Ve velmi měkkých zeminách nebo naopak v poloskalních horninách se měření počtů úderů upravuje. Zkouška se zastavuje v případě překročení dvojnásobku maximálního počtu úderů nebo při trvalém překračování hodnoty úderů na 1 m délky.



## 2.3 Vlivy na výsledky dynamické penetrace

### 2.3.1 *Geotechnické vlivy*

Geotechnické vlivy se soustředí na typy zemin, jejich hutnost, zrnitost, hladinu podzemní vody atd. V hrubozrnných zeminách budou výsledky penetrace ovlivňovat především vlastnosti jako ulehlost, zrnitost, tvar zrn.

U jemnozrnných zemin se na počtu úderů projeví zejména plášťové tření, které je možné omezit výplachem jílovou suspenzí. Dynamická penetrace v soudržných zeminách je ovlivněna právě plášťovým třením, které zatím není možné měřit. Nahrazuje se měřením momentu potřebného k otočení soutyčí. I přes toto opatření je nemožné tření dostatečně eliminovat a zvyšuje hodnoty penetračních odporů u jílovitých vrstev, které můžeme poté špatně klasifikovat.

Složení zeminy a její granulometrická křivka mají při pozorování významnou účast na hodnotách penetračního odporu. Zeminy, které obsahují velikostně rozmanitá zrna, kladou větší odpor. Zeminy špatně zrněné naopak při stejné ulehlosti kladou odpor menší. Na penetračních odporech se podílí i tvar zrn. Ostrohranná zrna se projeví nárůstem penetračního odporu.

Významná je u písků tzv. druhotná tuhost. Vzniká u přirozeně uložených písků. Písky, které jsou nasypány a zhutněny, totiž nedosahují stejných hodnot jako písky přirozeně uhlělé. N.J. Denisov sledoval druhotné zhutnění u písků, které byly naplaveny a už po 10 až 15 dnech se hodnoty penetračního odporu zvedly o 50%. Vznik této druhotné tuhosti se připisuje chemickým reakcím a následnému vzniku blán z kyseliny křemičité.

Penetrace pod hladinou podzemní vody významně ovlivní penetrační zkoušky. Podzemní voda obecně snižuje penetrační odpory. U nesoudržných zemin je to pravidlem. V prachovitých zeminách je počet úderů stejný nebo vyšší.

### 2.3.2 *Přístrojové vlivy*

Významné parametry přístroje, které mohou mít na výsledky penetrace vliv jsou hmotnost beranu, výška jeho pádu, poměr průměru kuželu a soutyčí, hmotnost soutyčí, tvar hrotu, kovadlina.

Hmotnost beranu a výška jeho pádu přímo ovlivňují energii, která je potřebná k zaražení hrotu do zeminy. Konstantní výšku pádu beranu na kovadlinu zajistí automatický systém zdvínání a spouštění. Tím se zajistí i předepsaná frekvence úderů. Energie úderů má být volena tak, aby zaražení probíhalo od 3 do 50 úderů na 10 cm vniku do zeminy. Při překročení 50 úderů v několika vrstvách po sobě je třeba zkoušku ukončit z důvodů možného poškození přístroje.

Poměr kuželu k soutyčí byl zvolen tak, aby se při zarážení soutyčí nenamáhalo vzpěrem a tím se ohýbalo. Ohýbání způsobuje druhotné tření a soutyčí se může i nevratně poškodit.

Hmotnost soutyčí se s postupujícím prováděním zkoušky zvětšuje. Tím pádem i hmotnost, kterou je potřeba do zeminy zarazit a se zvyšující se délkou soutyčí i jeho pružná deformace. Do výpočtu  $q_d$  je narůstající hmotnost soutyčí zahrnuta.

## 2.4 Vyhodnocování dynamických penetračních zkoušek

Při penetraci je zaznamenáván počet úderů, který je třeba na vnik do zeminy o deset centimetrů. Záznam se provádí do formuláře nebo při automatickém sběru dat do paměti přístroje. Přístroje disponující zobrazovací jednotkou mohou počet úderů ihned zobrazit v grafu podle hloubky. Důležitou hodnotou pro dynamickou penetraci je dynamický penetrační odpor,

$$q_d = \left( \frac{m}{m + m^l} \right) \frac{E}{A \cdot e}$$

kde

$m$  je hmotnost beranu v kg

$m^l$  je celková hmotnost penetračního soutyčí, kovadliny a vodících tyčí v kg

$h$  je výška pádu beranu v m

$A$  je plocha kužele na základně v m<sup>2</sup>

$e$  je průměrná penetrace na jeden úder ( $0,1/N_{10}$ ) v m

$N_{10}$  je počet úderů na vnik o 10 cm

$E$  je energie pádu beranu

$$E = m \cdot g \cdot h$$

kde

$m$  je hmotnost beranu v kg

$g$  je gravitační zrychlení v m<sup>2</sup>/s

$h$  je výška pádu beranu v m

Po výpočtu dynamických odporů se hodnoty vynesou do grafu a spojí se zalomenou křivkou. Vytvoří se tak spojitý obraz o průběhu zkoušky. Zlomy a přechody představují rozhraní geologických vrstev a zobrazují i jejich hloubku.

## 2.5 Zjišťování fyzikálních a indexových vlastností

Fyzikální a indexové vlastnosti zemin se mohou z dynamických penetračních zkoušek stanovovat přímo a to podle zjištěných vztahů, které byly odvozeny z výsledků penetračních zkoušek a laboratorních zkoušek. Vzniklé korelační vztahy musíme brát jako omezené, vzhledem k tomu, že na penetrační odpory má vliv řada činitelů. Uplatňuje se vývoj zemin, časový vývoj nadložních vrstev a další faktory utvářející zemní masiv. Je typ přístroje, resp. energie úderu při pádu beranu a rozměry penetračního soutyčí, pro který jsou závislosti stanovené.

### 2.5.1 Stanovení ulehlosti nesoudržných zemin

Dynamické penetrační zkoušky byly v počátcích jejich vývoje soustředěny na určování relativní ulehlosti nesoudržných zemin. V průběhu minulých let bylo sestaveno několik klasifikačních závislostí mezi odporem na hrotu nebo počtem úderů a ulehlostí. Následující klasifikace jsou výčtem z celé řady klasifikací, které vznikly, avšak jsou to pouze klasifikace platné obecně a vztažené k aktuálně platným normovým předpisům pro provádění dynamických penetračních zkoušek.

Tab. 2.2: Hutnost písků dle Bondarika (Matys, Ďavoda, Cuninka, 2010, s. 98)

Hutnost písků	$q_d$ [MPa]
velmi kyprý	<2,5
kyprý	2,5 až 5,0
kyprý až středně hutný	5,0 až 10,0
hutný	10,0 až 20,0
velmi hutný	20,0 až 40,0

Tab. 2.3: Hutnost eolických písků dle Oberta  
(Matys, Ďavoda, Cuninka, 2010, s. 99)

Hutnost písků	$q_d$ [MPa]
kyprý	<6,0
středně hutný	6,0 až 11,0
hutný	>11,0

Tab. 2.4: Hutnost písčitých štěrků a štěrků dle Oberta  
(Matys, Ěavoda, Cuninka, 2010, s. 99)

Hutnost štěrků až písčitých štěrků	$q_d$ [MPa]
kyprý	<11,2
středně hutný	11,2 až 23,0
hutný	>23,0

V uvedených tabulkách tab. 2.2 a tab. 2.3 můžeme vidět určitý rozptyl při stanovení hutnosti písků dle těchto dvou definicí. Dle Bondarika je stanovena i mez mimo normové hodnoty ulehlosti a to pro velmi kypré a velmi hutné písky. Další klasifikace dle Oberta pro štěrky a písčité štěrky je uvedena v tab. 2.4.

## 2.6 Další použití dynamických penetrací

Při výstavbě násypů jsou dynamické penetrace vhodné ke stanovení stupně ulehlosti a tím ke kontrole kvality zhutnění násypu. Pro aplikaci této metody je nutné stanovit korelační závislost mezi objemovou hmotností a dynamickým penetračním odporem  $q_{dyn}$ . Poté je možné rychle a levně kontrolovat stupeň zhutnění. Použití dynamické penetrace je pro tuto aplikaci bezpečné, jelikož máme kontrolu nad ukládanou zemínou do násypu a tím známe i její vlastnosti, na které jsou vytvořeny výpočetní vztahy.

Další aplikace dynamické penetrace je v možnosti stanovit tloušťky vrstev zemin v podloží. Podmínkou je ale rozdílný dynamický penetrační odpor zemin. Pokud penetrujeme do zemin s rozdílnými penetračními odpory je metoda dobře použitelná a po vynesení průběhu  $q_d$  můžeme vcelku spolehlivě určit přechody zemin.

Význam dynamické penetrace najdeme i v tvorbě inženýrskogeologických profilů. Uplatnění naleznou u rozsáhlých staveb, kde penetracemi můžeme zjistit průběh vrstev zemin, zahustit síť vrtů vytvořených pro laboratorní zkoušení zemin nebo objevit místa na stavbě, kterým je potřeba věnovat zvýšenou pozornost. Na stavbách rozsáhlých do plochy se penetrace aplikuje v pravidelné síti, u liniových staveb je uspořádání sond souhlasné s vedením trasy stavby.

## 3 PILOTOVÉ ZÁKLADY

Piloty jako prvky hlubinného zakládání jsou významným prvkem v zakládání staveb. Dále se řadí do kategorie speciálního zakládání, které klade zvláštní nároky na provádění. Hlavní výhodou pilot je jejich délka. Při budování piloty se dosahuje velkých hloubek a tím se dostáváme do únosnějších zemin, případně patu piloty vetkneme do nestlačitelných vrstev. Piloty se dělí na dvě základní skupiny:

- vrtané (replacement)
- ražené (displacement)

V této kapitole budeme věnovat pozornost především pilotám vrtaným, jejichž podíl na trhu v ČR je více než 90 %. Je to z důvodu jejich univerzálnosti a zkušeností s jejich prováděním. Ražené piloty v důsledku technologie jejich výroby mají řadu nevýhod.

### 3.1 Provádění vrtaných pilot

Vrtané piloty, jak vyplývá z jejich názvu, jsou prováděné zavrtáním nástroje do zeminy a vytěžením této zeminy. Zemina se po vytěžení nahradí betonem, který tvoří vlastní pilotu. Vrty pro piloty se provádějí buď nepažené nebo pažené. Pažené se rozdělují na pažené ocelovými pažnicemi a pažené jílovou suspenzí.

Nepažené vrty jsou prováděny především v zeminách, které jsou stabilní a při vrtání se stěny nesesouvají do vrtu. Jsou to především hutné nesoudržné zeminy a zeminy soudržné se stupněm konzistence  $I_C > 0,5$ .

Vrty pažené ocelovou pažnicí se provádějí podobným způsobem jako nepažené vrty, avšak vrtnému nástroji předchází ocelová pažnice. Pažnice se do zeminy vhání zavrtáváním, vibrováním případně beraněním. Pažnice jsou používány v zeminách, u kterých by se stěny vrtu sesouvaly. Pod hladinou podzemní vody se musí pažit vždy. Pažení není nutné provádět na celou délku vrtání. V mnoha případech se vrt zapaží pouze ve vrchní části, kde se vrtá v nestabilních horninách a zbytek vrtu je bez pažení.

Další způsob pažení při vrtání pilot je použití jílové suspenze. Ta zajišťuje stěnu i dno účinky hydrostatického tlaku a jílovým filtračním koláčem, který se na povrchu stěn vytvoří. Pokud je jílová suspenze v klidu, stává se z ní gel a má výrazně vyšší vnitřní odpor než čerstvě rozmíchaná suspenze. Jílovou suspenzi lze opět převést na kapalinu mícháním. Tato vlastnost se dá neustále opakovat. Používání jílové suspenze klade zvýšené nároky na technologii provádění a udržení kvality pažící jílové suspenze.

Po provedení vrtu pro pilotu se začne s betonáží. Na piloty se používá beton prostý nebo železobeton. Beton pro piloty musí být samozhutnitelný, mít dobrou zpracovatelnost a odolnost proti rozměšování. Třída betonu se volí na dolní hranici nabízeného sortimentu až do třídy C30/37. Vyšší třídy nejsou potřebné a v požadované zpracovatelnosti je lze jen těžko vyrobit. Samotné betonáži u železobetonu předchází osazení výztuže, nejčastěji v podobě armokoše. I piloty z prostého betonu jsou vyztuženy, ale pouze v hlavě piloty kde výztuž navazuje na kotevní výztuž pro horní stavbu. Kotevní výztuže jsou zapíchány až do hlavy piloty do čerstvého betonu.

Ukládání betonu do vrtu je možné provádět několika způsoby, které se volí podle stavu vrtu. Betonáž za sucha se provádí pouze u vrtů absolutně suchých. Používá se usměrňovací roura, která usměrňuje proud betonové směsi ukládané do vrtu. Betonáž pod vodou nebo pažící suspenzí je prováděna pomocí sypákové roury, která zasahuje až na dno vrtu, je vždy ponořená pod hladinou betonu a zabraňuje rozmíslení a znehodnocení betonu pažící suspenzí. Roura se postupně vytahuje jak stoupá hladina betonu ve vrtu.

Pilota se přebetonuje nad svojí projektovanou výšku a po částečném zatuhnutí betonu se znehodnocený beton v hlavě piloty odbourává. Pokud pilota nebyla přebetonována nad projektovanou výšku, vybetonuje se její nová hlava, na které bude uložena horní stavba.



Obr. 3.1: Souprava pro vrtání pilot ([www.kellergrundbau.cz](http://www.kellergrundbau.cz))

## 4 NÁVRH PILOT NA ZÁKLADĚ PENETRAČNÍCH ZKOUŠEK

### 4.1 Návrh na základě statických penetračních zkoušek

#### 4.1.1 Piloty v nesoudržných zeminách (Matys, Ťavoda, Cuninka, 1990)

Vzhledem k tomu, že penetrační sonda je zmenšený model piloty, je možné odhadovat z penetrační zkoušky na chování piloty, při zahrnutí vhodných vztahů, které vyjádří podobnost mezi penetrační sondou a pilotou.

U pilot vetknutých patou v nesoudržných zeminách se vychází ze vztahu dle Menzenbacha mezi odporem na hrotu penetrační sondy  $q_c$  a odporem pod patou piloty  $q_p$ .

$$q_p = \frac{q_c}{f_1}$$

kde  $f_1$  je součinitel modelové podobnosti piloty a penetrační sondy.

$$f_1 = 1 + 5 \cdot 10^{-7} \cdot q_c^{1,3} \cdot A_p$$

kde  $A_p$  je plocha paty piloty.

Mezní únosnost piloty se poté vypočítá z následujícího vztahu

$$U_u = U_{bu} + U_{fu} = m \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \frac{q_{cp}}{f_1} + m \cdot \pi \cdot d \sum h_i \cdot f_{si}$$

kde

$U_u$  mezní únosnost piloty

$U_{bu}$  mezní únosnost paty piloty

$U_{fu}$  mezní odpor na plášti piloty

$d$  průměr piloty

$q_{cp}$  průměrný penetrační odpor v úrovni paty piloty

$f_1$  součinitel modelové podobnosti

$h_i$  tloušťka  $i$ -té vrstvy

$f_{si}$  plášťové tření v  $i$ -té vrstvě

$m$  součinitel vlivu technologie provádění piloty, pro vrtané piloty  $m = 0,6$

Průměrný penetrační odpor  $q_{cp}$  se vypočítá jako aritmetický průměr hodnot penetrační odporů naměřených ve vrstvě  $5d$  nad úrovní paty až  $3d$  pod úrovní paty piloty. Plášťové tření se stanovuje přímo z penetrační zkoušky.

V případě, kdy je vrstva zeminy ve které se nachází pata piloty příliš tenká a vrstva zeminy pod ní má výrazně menší únosnost, hrozí propíchnutí do této vrstvy, průměrná hodnota  $q_{cp}$  se vypočte z rovnice

$$q_{cp} = \frac{1}{2 \cdot n} (q_{c1} + q_{c2} + q_{c3} + \dots + q_{cn}) + n \cdot q_{cn}$$

kde  $q_{c1}, q_{c2}$  jsou jednotlivé penetrační odpory po 20 cm v uvedeném rozsahu  $5d$  nad úrovní paty piloty a  $3d$  pod její úrovní.

Výpočtová únosnost se stanoví pomocí součinitele bezpečnosti  $F = 2$ .

$$U_{vd} = \frac{U_u}{2}$$

Některé zdroje uvádějí používání vyšších stupňů bezpečnosti až  $F = 3$ . Další zdroje také rozlišují součinitele bezpečnosti pro patu piloty a plášť piloty a to  $F = 3$  pro patu a  $F = 2$  pro plášť. Pro další aplikace bude využíváno obecně  $F = 2$ .

#### 4.1.2 Piloty v soudržných zeminách (Matys, Ěavoda, Cuninka, 1990)

V soudržných zeminách se uplatňuje převážně odpor na plášti piloty a jedná se obyeějně o piloty plovoucí. Výpočet únosnosti pilot v soudržných zeminách je téměř totožný s předchozím výpočtem v nesoudržných zeminách. V tomto případě se ale součinitel modelové podobnosti  $f_1$  neuvažuje dle Menzenbacha, ale volí se  $f_1 = 2,0$ . Tření na plášti se určí z penetrační zkoušky, tedy přímým měřením nebo se vychází z hodnoty koheze soudržných zemin  $f_s = \beta \cdot c_u$ .

Tab. 4.1: Hodnoty součinitele  $\beta$  pro soudržné zeminy dle Skempton a Tomlinsona (Matys, Ěavoda, Cuninka, 1990, s. 66)

Konzistence	$q_c$ [MPa]	$\beta$
velmi měkká	0,5	1
měkká	0,5 až 1,0	1 až 0,75
tuhá	1,0 až 2,0	0,75 až 0,5
pevná	2,0 až 4,0	0,5 až 0,35



### 4.1.3 Využití softwaru pro výpočet únosnosti piloty

Pro usnadnění výpočtů únosnosti pilot vytvořila firma Fine spol. s r.o. do svého geotechnického softwaru GEO5 modul Pilota CPT. Program na základě dat z penetračních zkoušek analyticky vypočítá únosnost pilot. V možnostech nastavení výpočtu, je v nabídce několik typů výpočtů. Tyto rozdílné přístupy poskytují často rozptýlené hodnoty únosností pilot. Tyto metody se od sebe liší především v:

- určení ekvivalentního (průměrného) penetračního odporu
- stanovení redukčních součinitelů  $\alpha$  pro únosnost paty a pláště piloty

Modul CPT pilota pracuje následovně. V menu nastavení výpočtu máme na výběr několik typů výpočtů (EN 1997 - 2, NEN 6743, LCPC - Bustamante, Schmertmann) a metodik posouzení. Typy výpočtů, jak bylo zmíněno výše, se od sebe odlišují a tím se liší i výsledná hodnota únosnosti vypočítaná na základě těchto postupů. Dále je třeba do modulu importovat CPT zkoušku. Pro další výpočty je nezbytný krok klasifikace zemin. Tato klasifikace probíhá na základě studie Robertsona, který v roce 1986 tuto klasifikaci vytvořil a v roce 2010 ji upravil. Tato metoda pracuje s penetračním odporem  $q_c$ , plášťovým třením  $f_s$  a případně pórovým tlakem  $u_2$ . Dále se zavádí součinitel  $a$ , tzv. koeficient penetrometru, někdy také jako  $\alpha$ , který eliminuje nepřesnosti třecí objímky a kuželového hrotu, běžně v hodnotách 0,7 - 0,85. Z opravené hodnoty odporu kužele

$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a)$$

a procentuálního poměru plášťového tření

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} \cdot 100\%$$

se provede klasifikace do příslušného typu zeminy obr.4.1.

V případě ponechání výpočtu objemové tíhy zeminy na softwaru, se objemová tíha  $\gamma$  [kN/m<sup>3</sup>] vypočítá dle následujícího vztahu:

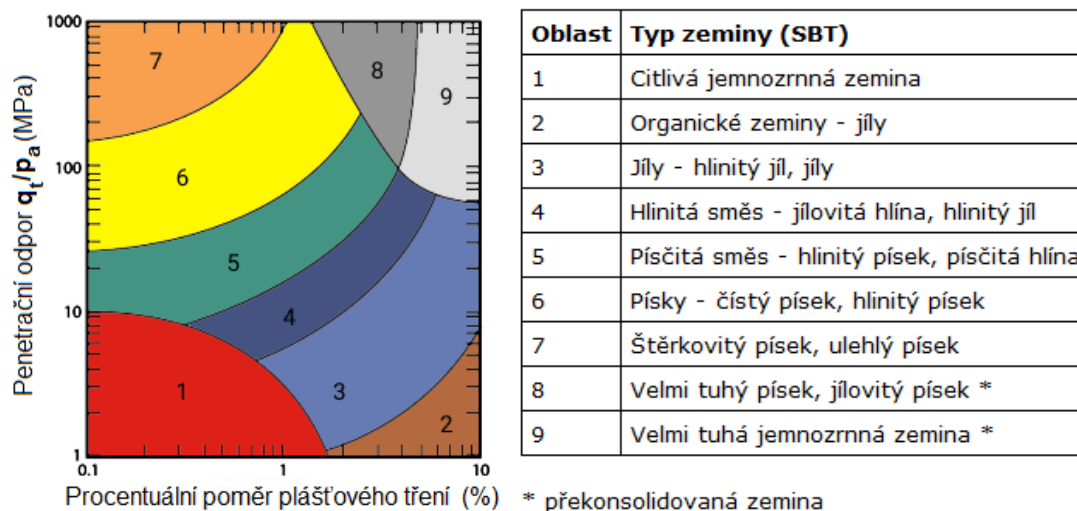
$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = 0,27 \cdot (\log R_f) + 0,36 \cdot \left( \log \frac{q_t}{p_a} \right) + 1,236$$

kde

$\gamma_w$  objemová tíha vody ( $\approx 10$ ) [kN/m<sup>3</sup>]

$p_a$  atmosférický tlak ( $\approx 100$ ) [kPa]

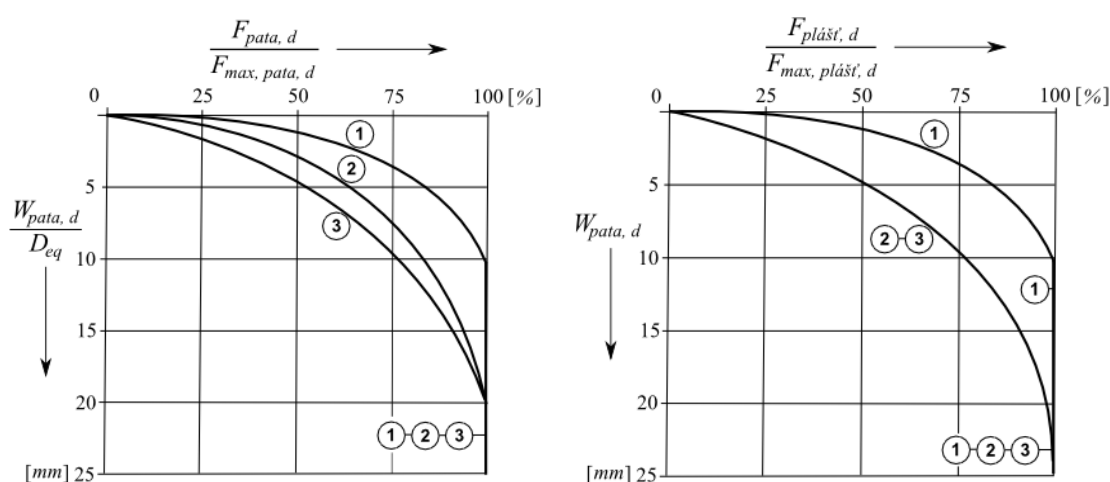
Klasifikace zeminy není klasifikace ve smyslu ČSN 73 1001 nebo EN ISO 14688. Zemina je zatříděna dle metody Soil behaviour type (SBT). Klasifikace je orientována na zeminy, které vykazují podobné vlastnosti s podobným chováním, jak



Obr. 4.1: Klasifikace dle Robertsona 2010 (www.fine.cz)

napovídá název metody. Tato klasifikace je důležitá pro určení součinitelů únosnosti  $\alpha$  na plášti a patě piloty. Pro jednotlivé typy výpočtu jsou sestaveny tabulky, které tyto součinitele uvádí.

Po provedení výpočtu únosnosti piloty, lze provést výpočet sednutí piloty. Při výpočtu je vykreslena mezní zatěžovací křivka piloty. Sednutí se skládá ze tří částí. Sednutí pláště, sednutí piloty a pružná deformace betonu piloty. Sednutí pláště a paty je odvozeno z grafů na obr. 4.2 a závisí na poměru zatížení vyvozeného a zatížení maximálního, zvláště na patu a plášti piloty. Tato metoda bude poskytovat rozdílné výsledky pro různé metody výpočtu únosnosti pilot, jelikož každý typ výpočtu poskytuje jinou hodnotu mezní únosnosti piloty.



Obr. 4.2: Grafy pro výpočet sedání převzaté z normy NEN 6743.

1 - ražené piloty, 2 - průběžný šnek, 3 - vrtané piloty

## 4.2 Návrh na základě dynamických penetračních zkoušek

Dynamické penetrační zkoušky, jak bylo popsáno výše, neumožňují měřit plášťové tření. Lze jej pouze dle dříve publikovaných vztahů vypočítat z kroutícího momentu, avšak ten není vždy měřen nebo přístroje nejsou vybaveny dynamometry. Jelikož je plášťové tření zásadní hodnotou pro únosnost pilot, bylo v této práci ustoupeno od aplikace dynamické penetrace při návrhu pilotových základů.

## 5 VÝPOČTY ÚNOSNOSTI PILOT A POROVNÁNÍ PŘÍSTUPŮ K VÝPOČTŮM

### 5.1 Výpočty ze statických penetračních zkoušek

Pro výpočty únosnosti piloty byla využita penetrační sonda PS402. Data z této sondy jsou uvedeny v příloze A Záznam dat ze statické penetrační zkoušky - sonda PS402 a také je použita Geotechnická interpretace penetrační sondy v příloze B. Jako modelová pilota byla zvolena pilota prováděná vrtáním s průměrem 0,82 m a hloubkou 15 m.

Jako příklad byly zvoleny hodnoty zatížení na pilotu:

- Návrhové zatížení  $F_{sd} = 2000 \text{ kN}$
- Užité zatížení  $F_s = 1500 \text{ kN}$

#### 5.1.1 Výpočet dle modelové podobnosti penetrační sondy a piloty

Následující výpočet mezní únosnosti piloty se řídí dle vztahů v kapitole 4.1.1 a 4.1.2. Vstupní data pro výpočet jsou

průměr piloty .....	0,82 m
délka piloty .....	15 m
zemina .....	soudržná $\Rightarrow f_1 = 2$
způsob provádění .....	pilota vrtaná s ocelovou výpažnicí $\Rightarrow m = 0.6$
data z penetrační zkoušky .....	Záznam dat ze statické penetrační zkoušky - sonda PS402

Pro výpočet je použita penetrační sonda PS402, která byla provedena v rámci průzkumu pro inženýrské dílo v oblasti Přerov - Lipník n.B., firmou GEOtest, a.s.

#### Výpočet mezní únosnosti paty piloty:

Průměrný penetrační odpor od  $5d = 10,8\text{m}$  nad úrovní paty do  $3d = 17,6\text{m}$  pod úrovní paty piloty.

$$q_{cp} = \frac{\sum q_n}{n} = \frac{4,3 + 4,28 + \dots + 6,32 + 6,08}{34} = 5,911 \text{ MPa}$$

Mezní únosnost paty piloty poté

$$U_{bu} = m \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{q_{cp}}{f_1} = 0,6 \cdot \frac{\pi \cdot 0,82^2}{4} \cdot \frac{5,911 \cdot 10^6}{2} = 936,51 \text{ kN}$$

**Výpočet mezní únosnosti pláště piloty:**

Základní hodnotou je suma součinů plášťového tření a mocnosti vrstvy ve které bylo plášťové tření naměřeno. Výpočet je proveden z penetrační zkoušky, kde jsou hodnoty plášťového tření odečítány po 20 cm. Pro výpočet je tedy mocnost vrstvy 0,2 m a plášťové tření odpovídající této vrstvě.

$$\begin{aligned} \sum h_i f_{si} &= 0,2 \cdot 0 + 0,2 \cdot 128 + 0,2 \cdot 167 + \dots + 0,2 \cdot 229 + 0,2 \cdot 272 \\ &= 2071,39 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Mezní únosnost pláště piloty poté

$$U_{fu} = m \cdot \pi \cdot d \cdot \sum h_i \cdot f_{si} = 0,6 \cdot \pi \cdot 0,82 \cdot 2071,39 \cdot 10^3 = 3201,67 \text{ kN}$$

**Celková únosnost piloty**

$$U_u = U_{bu} + U_{fu} = 936,51 + 3201,67 = 4138,18 \text{ kN}$$

**Výpočtová únosnost piloty**

Zahrnutí součinitele bezpečnosti  $F = 2$

$$U_{vd} = \frac{U_u}{F} = \frac{4138,18}{2} = 2069 \text{ kN}$$

### 5.1.2 Výpočet únosnosti a sedání piloty z dat penetrační zkoušky

V kap. 4.1.3 je pojednáno o výpočtu mezní únosnosti a sedání pilot za využití softwaru firmy Fine, GEO5 modul Pilota CPT. V této kapitole budou představeny výsledky několika výpočetních metod které software nabízí.

Jak bylo uvedeno v kap. 4.1.3 je zde patrný významný rozdíl v hodnotách mezní únosnosti a sedání piloty. Mezní únosnost piloty je závislá na typu výpočtu a parametrech, které jsou do výpočtu zahrnuty. Jako referenční je zvolena hodnota dle EN 1997 - 2, se kterou budou další výsledky porovnávány, jelikož je pro ČR tato norma závazná. Výsledky odpovídají metodě výpočtu sedání, která je pro všechny typy výpočtu stejná, ale každý typ výpočtu udává jinou mezní únosnost piloty, na které závisí výpočet sednutí. Metoda výpočtu sedání je převzata pro všechny typy výpočtů z normy NEN 6743, je tedy vhodné považovat sedání pro tento typ výpočtu za referenční a hodnotit ostatní sedání dle něj. Vše ilustruje tab. 5.1.

Protokol výpočtu únosnosti a sedání piloty je uveden v příloze C Protokol GEO5 modul Pilota CPT.

Tab. 5.1: Porovnání únosností piloty vypočtené různými metodami.

typ výpočtu	návrhová únosnost [kN]	sedání [mm]
EN 1997 - 2	3629	6,3
NEN 6743	4347	6,8
LCPC (Bustamante)	1928	53,7
Schmertmann	2309	17,3

### 5.1.3 Výpočet únosnosti a sedání na základě laboratorních zkoušek

Pro tento výpočet byl sestaven zemní profil, který je zpracován v geotechnické interpretaci penetrační sondy. Zeminy do něj zařazené vycházejí ze stejné interpretace. Pevnostní parametry zemin jsou voleny z laboratorních zkoušek provedených v příslušných vrstvách a také odhadem ve vrstvách, kde laboratorní zkoušky provedeny nebyly. Odhad bylo možné provést z důvodu přesného rozhodnutí geotechnika o pevnostních parametrech zemin, při provádění penetrační sondy. Ten určil z dat provedené penetrační zkoušky intervaly totální koheze a stupně konzistence. Při srovnání laboratorních zkoušek, ve vrstvách kde byly provedeny a odhadu geotechnika, byl tento odhad shledán jako akceptovatelný pro další použití. Srovnání laboratorních zkoušek a odhadu geotechnika nám prezentuje pro vrstvy 5 - 7 tab. 5.2.

Pro přiřazení pevnostních parametrů, bylo použito přednostně výsledků laboratorních zkoušek. Pro vrstvy, které nebyly laboratorně odzkoušeny, byly voleny pevnostní parametry z geotechnické interpretace penetrační sondy. Pevnostní parametry v těchto vrstvách byly voleny jako průměr intervalu určeného geotechnikem. Souhrn zemního profilu je uveden v tab. 5.3.

Výpočtem piloty z parametrů v tabulce 5.3, jsme získali svislou únosnost piloty

$$R_c = 2708 \text{ kN}$$

a sedání piloty, dle Masopusta, z těchto parametrů je

$$s = 3,6 \text{ mm}$$

Protokol výpočtu únosnosti a sedání piloty je uveden v příloze D Protokol GEO5 modul Pilota.

Tab. 5.2: Parametry zemin z laboratorních zkoušek a odhad těchto parametrů geotechnikem z penetrační sondy.

č.	Zeminy	hloubka od - do [m]	laboratorní výsledky		odhad z penetrační sondy	
			$I_c$	$c_u$ [kPa]	$I_c$	$c_u$ [kPa]
1	navážka	0 - 0,4	-	-	>1,3	-
2	jílovitá hlína, tuhá	0,4 - 2,6	-	-	0,72 - 0,87	40-60
3	jíl, tuhý až pevný	2,6 - 6,4	-	-	0,91 - 1,12	80 - 95
4	jíl, pevný	6,4 - 8,2	-	-	1,11 - 1,13	90 - 100
5	jíl, pevný	8,2 - 11,8	1,07	56	1,10 - 1,14	100 - 120
6	jíl, pevný až tvrdý	11,8 - 16,4	1,07	159	1,18 - 1,26	140 - 160
7	jíl, tvrdý	16,4 - 21	1,09	146	>1,3	180 - 200

Tab. 5.3: Parametry zemin použité pro výpočet únosnosti piloty. Zvýrazněné hodnoty jsou převzaty z laboratorních zkoušek.

č.	Zeminy	hloubka od - do [m]	$I_c$	$c_u$ [kPa]
1	navážka	0 - 0,4	-	-
2	jílovitá hlína, tuhá	0,4 - 2,6	0,79	45
3	jíl, tuhý až pevný	2,6 - 6,4	1,1	80
4	jíl, pevný	6,4 - 8,2	1,12	90
5	jíl, pevný	8,2 - 11,8	<b>1,07</b>	<b>56</b>
6	jíl, pevný až tvrdý	11,8 - 16,4	<b>1,07</b>	<b>159</b>
7	jíl, tvrdý	16,4 - 21	<b>1,09</b>	<b>146</b>

### 5.1.4 Sestavení korelačních vztahů

Pro výpočet únosnosti piloty z dat penetrační zkoušky je vhodné mít k dispozici výpočetní vztahy, které uvádí závislost mezi hodnotou naměřenou při penetrační zkoušce a fyzikální, mechanickou nebo indexovou vlastností zeminy. Pro tento účel byla autorem vytvořena databáze, která obsahuje data z penetračních a laboratorních zkoušek zemin. Data pro tuto databázi dodaly firmy GEOtest a.s. a Geostar, spol. s.r.o.. Penetrační sondy a vrty pro odběr vzorků byly sestrojeny v těsné blízkosti, můžeme tedy zavést úvahu, že prostupují stejným zemním prostředím o stejné mocnosti vrstev. Hlavní předností databáze je sjednocení výsledků penetračních a laboratorních zkoušek a možnost jednoduchého výběru dat potřebných pro zkoumání a hledání nejvhodnějších závislostí.

Penetrační zkoušky jsou velmi ovlivněny prostředím ve kterém jsou prováděny. Sestavení korelací je tedy vázáno na typ zeminy. Vytvoření univerzální závislosti by mohlo předkládat nesprávné hodnoty pevnostních parametrů. Pro účely této korelace byly zeminy rozděleny do databáze podle typů, především dle jejich geneze. Například jsou to tyto typy zemin:

- neogenní jíl
- kvarterní hlína
- kvarterní jíl
- kvarterní písčité jíl
- kvartérní písek - fluviální a další

Největší počet provedených zkoušek se vyskytuje u neogenního jílu. Z tohoto důvodu byla tato zemina vybrána pro vytvoření korelací. Dalším důvodem byla velká četnost výskytů tohoto typu zeminy v Brně a jeho okolí. Musel být však brán ohled i na sledovanou sondu PS402. Ta obsahuje i vrstvu kvarterní hlíny a musela tedy být korelace vytvořena i pro tento typ zemin. Souhrn vrstev s jednotlivými typy zemin je uveden v tab. 5.4.

Následující odhady závislostí mezi penetračními hodnotami a pevnostními parametry zemin jsou provedeny pro neogenní jíl, tedy pro vrstvy č. 4 - 7. Stejné postupy a teorie jsou aplikovány i na sestavení korelačních vztahů pro kvarterní hlínu, tedy vrstvy č. 2 - 3. Vrstva č. 1 - navázka je považována za neúnosnou vrstvu. Zjištěné závislosti pro kvarterní hlínu budou prezentovány dále.

Při hledání vztahů mezi  $q_c$  a  $c_u$  bylo hledání zaměřeno na lineární závislost mezi sledovanými veličinami. K vyhledání vhodných lineárních a absolutních členů rovnice, které co nejlépe vystihnou vztah mezi sledovanými veličinami byl použit statistický software Minitab. V tomto softwaru byla provedena i statistická analýza dat.



Tab. 5.4: Tabulka vrstev s přiřazeným typem zemin.

		typ zeminy	popis zeminy
1. VRSTVA	od 0,0 m do 0,4 m	-	navážka
2. VRSTVA	od 0,4 m do 2,6 m	kvarterní hlína	jílovitá hlína, tuhá
3. VRSTVA	od 2,6 m do 6,4 m	kvarterní písčitý jíl	jíl, tuhý až pevný
4. VRSTVA	od 6,4 m do 8,2 m	neogenní jíl	jíl, pevný
5. VRSTVA	od 8,2 m do 11,8 m	neogenní jíl	jíl, pevný
6. VRSTVA	od 11,8 m do 16,4 m	neogenní jíl	jíl, pevný až tvrdý
7. VRSTVA	od 16,4 m do 21,0 m	neogenní jíl	jíl, tvrdý

Statistickou analýzou hodnot  $c_u$  a  $q_c$  byl získán variační koeficient  $V(x)$ , Pearsonův koeficient korelace  $\rho$  a p - value, neboli hladina, na které zamítáme hypotézu, že  $\rho = 0$ .

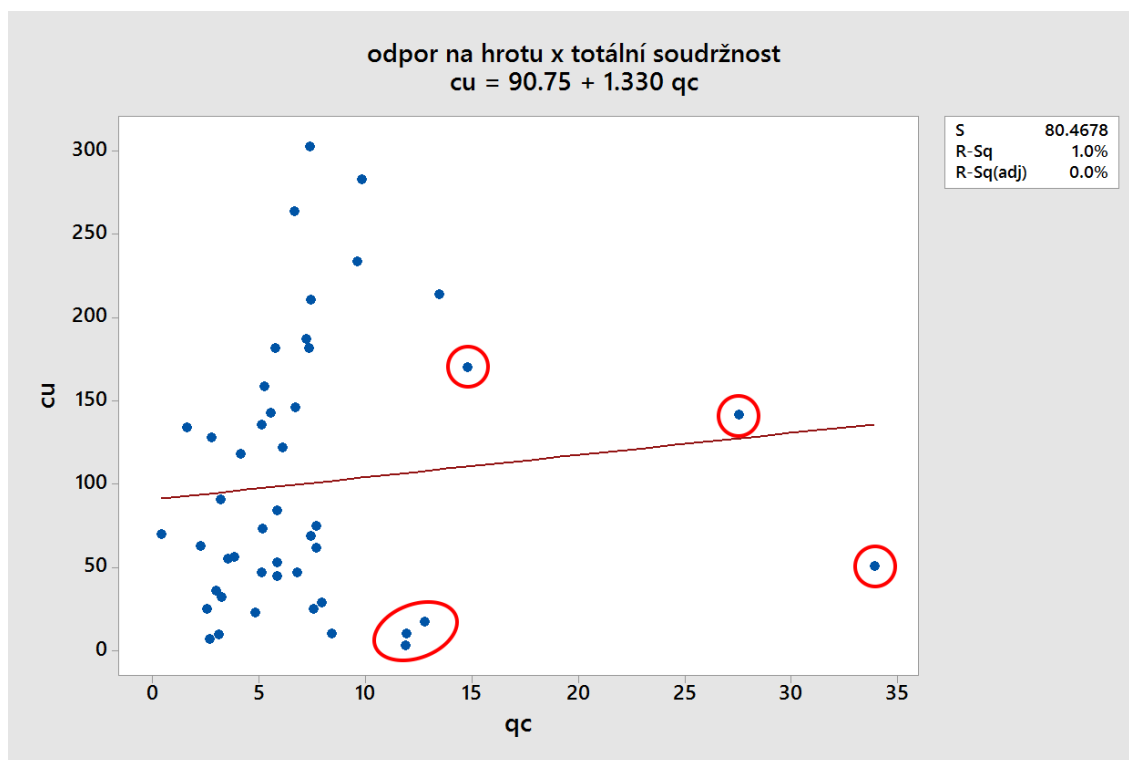
Na obr. 5.1 je zobrazena lineární závislost mezi sledovanými veličinami s rovnicí

$$c_u = 90,75 + 1,330 \cdot q_c$$

Statistická analýza pro tento soubor dat vykazuje hodnoty:

- počet hodnot:  $n = 46$
- variační koeficient pro  $q_c$  :  $V(q_c) = 0,811$
- variační koeficient pro  $c_u$  :  $V(c_u) = 0,795$
- Pearsonův korelační koeficient:  $\rho = 0,100$
- p - value = 0,510

Tato analýza poskytla cenou informaci v podobě korelačního koeficientu  $\rho$ , který je roven 0,100. Tato hodnota udává, že soubor dat je téměř nekorelovatelný. Na obr. 5.1 jsou v červených oblastech vyznačeny hodnoty, které vykazují vlastnosti odlehlých hodnot a významně ovlivní korelační koeficient. Proto byly tyto hodnoty ze souboru vyřazeny. Soubor dat s novou závislostí mezi veličinami, po provedené redukci odlehlých hodnot, představuje obr. 5.2.



Obr. 5.1: I. korelace. Použity jsou všechny hodnoty, které byly z databáze.

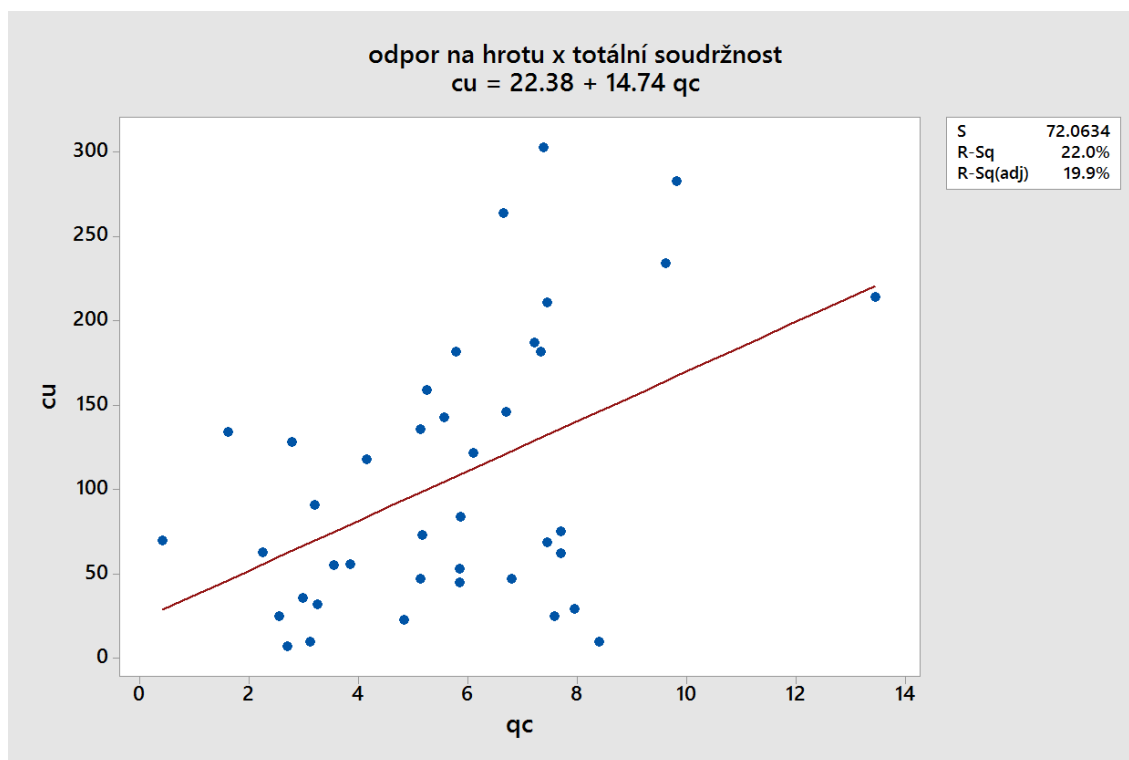
Po vyřazení odlehlých hodnot ze souboru, byla provedena opět statistická analýza s výsledkem:

- počet hodnot:  $n = 40$
- variační koeficient pro  $q_c$  :  $V(q_c) = 0,453$
- variační koeficient pro  $c_u$  :  $V(c_u) = 0,761$
- Pearsonův korelační koeficient:  $\rho = 0,469$
- p - value = 0,002

Je zřejmé, že všechny sledované hodnoty doznaly významných pozitivních změn. Zejména korelační koeficient  $\rho = 0,469$ . Tímto se zpřesnila odhadovaná závislost, která se změnila na

$$c_u = 22,38 + 14,74 \cdot q_c$$

Vzhledem k této závislosti byla provedena úvaha, zda je rovnice s absolutním členem průkazná. Dle této závislosti by při nulovém penetračním odporu byla totální koheze rovna 22,38 kPa. Při používání tohoto vztahu by mohly nastat potíže u malých penetračních odporů, kde by vycházela totální soudržnost poměrně velká, vzhledem k vyšším penetračním odporům. Pro porovnání průběhu totální soudržnosti byl tedy absolutní člen vypuštěn.



Obr. 5.2: II. korelace. Soubor dat po vyřazení odlehlých hodnot.

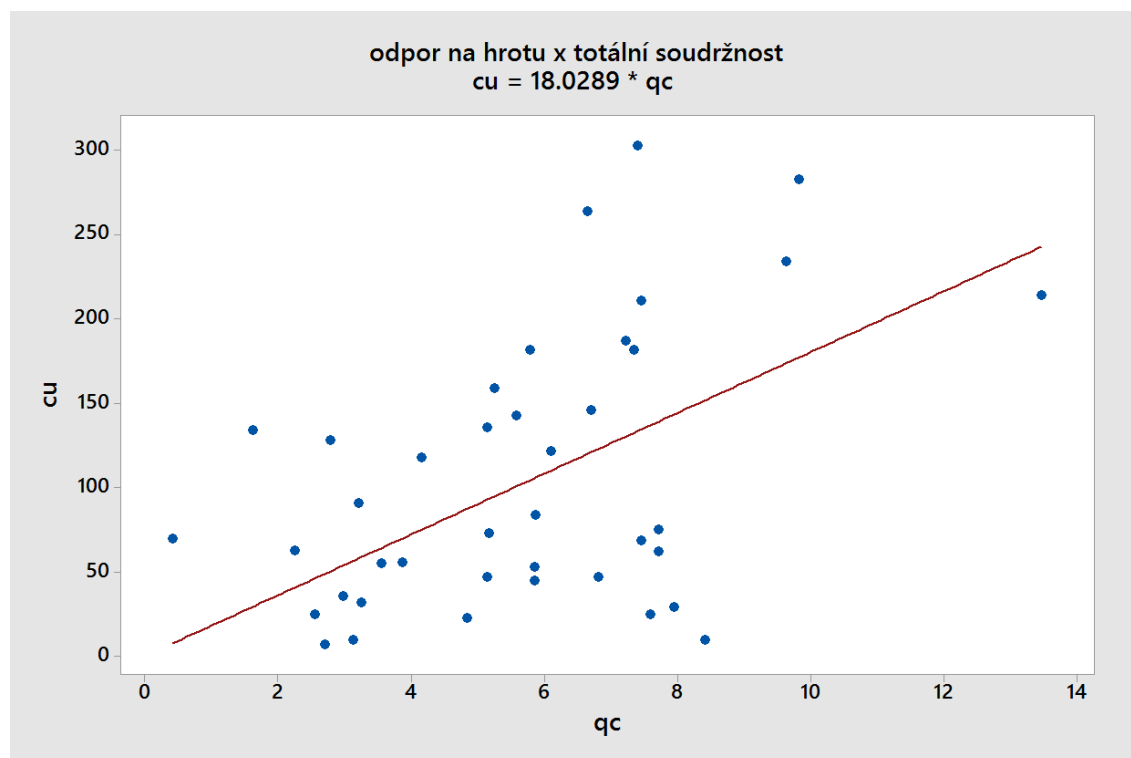
Po zavedení této úvahy se vztah pro výpočet totální soudržnosti změnil na

$$c_u = 18,0289 \cdot q_c$$

Tato závislost je zobrazena na obr.5.3.

Při hledání nejvhodnějších závislostí mezi pevnostními parametry a hodnotami z penetračních zkoušek, byla provedena i analýza závislosti totální soudržnosti  $c_u$  na plášťovém tření  $f_s$ . Pro ukázkou je v tab. 5.5 vypočítána totální soudržnost z plášťového tření dle vztahu  $c_u = 61,47 + 0,1789 \cdot f_s$ . Z dostupných dat se však nepodařilo získat dostatečně spolehlivý vztah, jelikož Pearsonův korelační koeficient  $\rho = 0,241$ . Oproti závislosti založené na penetračním odporu byla tedy shledána úvaha využití plášťového tření pro výpočet totální soudržnosti jako nepřesná.

Pro úplné využití penetrační zkoušky k výpočtu únosnosti piloty i sedání, je zkoumána i závislost stupně konzistence  $I_C$  na některé z hodnot získané z penetračních zkoušek. Pro výpočet sedání piloty dle Masopusta, stupeň konzistence postačuje jako jediná vstupní hodnota. Byla provedena obdobná analýza dostupných dat, jako při hledání závislosti totální soudržnosti na penetračním odporu nebo plášťovém tření. Po provedení několika regresních modelů a vyřazení odlehlých hodnot, byla vybrána závislost stupně konzistence na plášťovém tření jako nejprůkaznější pro tento sledovaný soubor dat.



Obr. 5.3: III. korelace. Soubor dat a regresní čára lineární funkce bez absolutního členu.

Převážně byl sledován Pearsonův korelační koeficient. Pro výsledný soubor dat, zbavený odlehlých hodnot, vykazuje hodnotu  $\rho = 0,213$ . I když je to hodnota udávající velmi obtížně korelovatelný soubor dat, bylo výsledného vztahu využito z důvodů porovnání právě těchto dostupných dat. Další důvod pro využití stupně konzistence z následujícího vztahu je, aby se výpočet piloty na základě penetrační zkoušky neovlivňoval jinými vstupy a to například laboratorními zkouškami nebo dříve odvozenými vztahy. Vztah pro výpočet stupně konzistence je tedy

$$I_C = 0,9787 + 0,000168 \cdot f_s$$

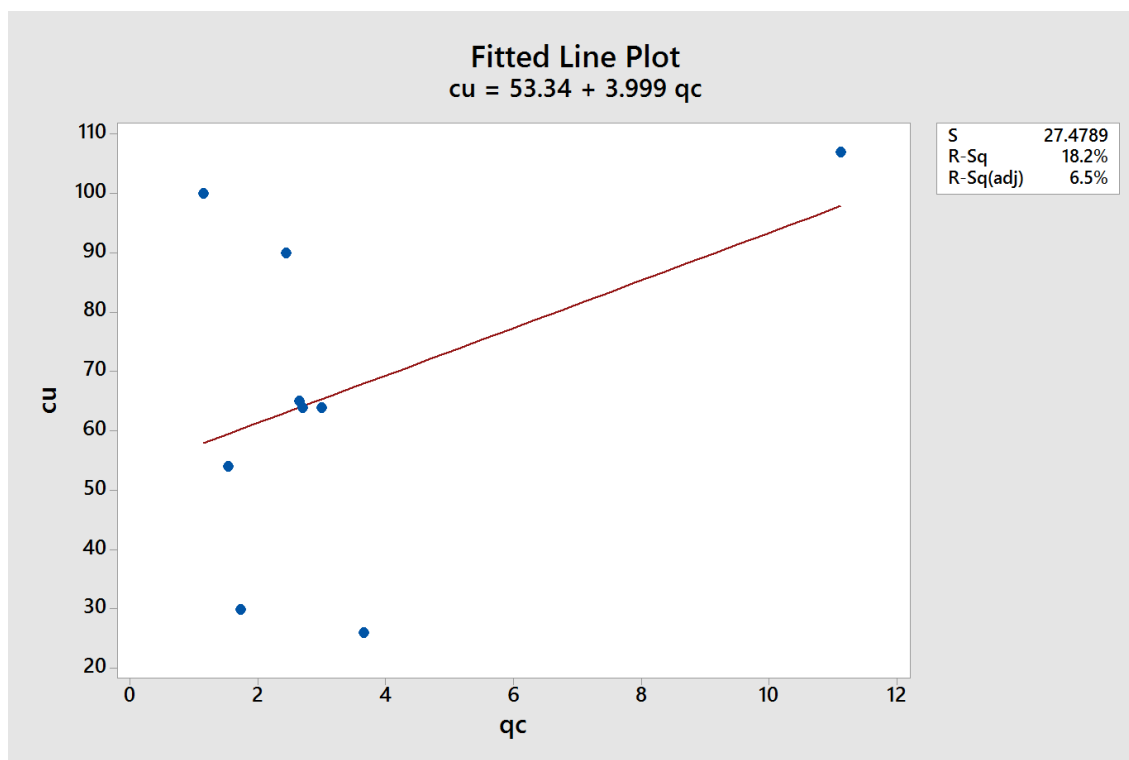
Pro výpočet stupně konzistence bylo využito průměrné plášťové tření v jednotlivých vrstvách. Výsledné hodnoty stupně konzistence jsou uvedeny v tab. 5.5.



Všechny výše uvedené vztahy platí pro neogenní jílu. Jak již bylo zmíněno, penetrační zkoušky ovlivňuje zejména prostředí ve kterém jsou prováděny. Proto bylo z důvodů rozmanitosti typů zemin ve sledované sondě nutno provést i korelaci hodnot pro kvarterní hlínu a kvarterní písčité jílu. Z důvodů omezeného počtu dat jsou však korelace nepřesné. Především nedostupnost dat u kvarterního písčitého jílu vnáší do výpočtu únosnosti piloty další nepřesnosti. Tento problém byl vyřešen převzetím korelace pro kvarterní hlínu za předpokladu, že zeminy v kvartéru se vyvíjely podobně a jejich mírně odlišné vlastnosti se projeví v penetračních odporech nebo plášťovém tření.

V následujících odstavcích je uvedeno získání vztahů k výpočtu totální soudržnosti a stupně konzistence pro kvarterní hlínu. Postupy byly aplikovány obdobné jako u neogenního jílu, avšak data byla ponechána bez výraznějšího zásahu, vzhledem k jejich malé četnosti.

Jako první bylo provedeno hledání závislosti totální soudržnosti  $c_u$  na penetračním odporu  $q_c$ . Jelikož tato závislost vykazovala u neogenního jílu největší shodu, nebyla sledována závislosti mezi  $c_u$  a  $f_s$ . Na obr. 5.4 je zobrazen soubor dat pro získání této závislosti.



Obr. 5.4: Korelace pro  $c_u$  závislé na  $q_c$  pro kvarterní hlíny.

Statistická analýza tohoto souboru dat:

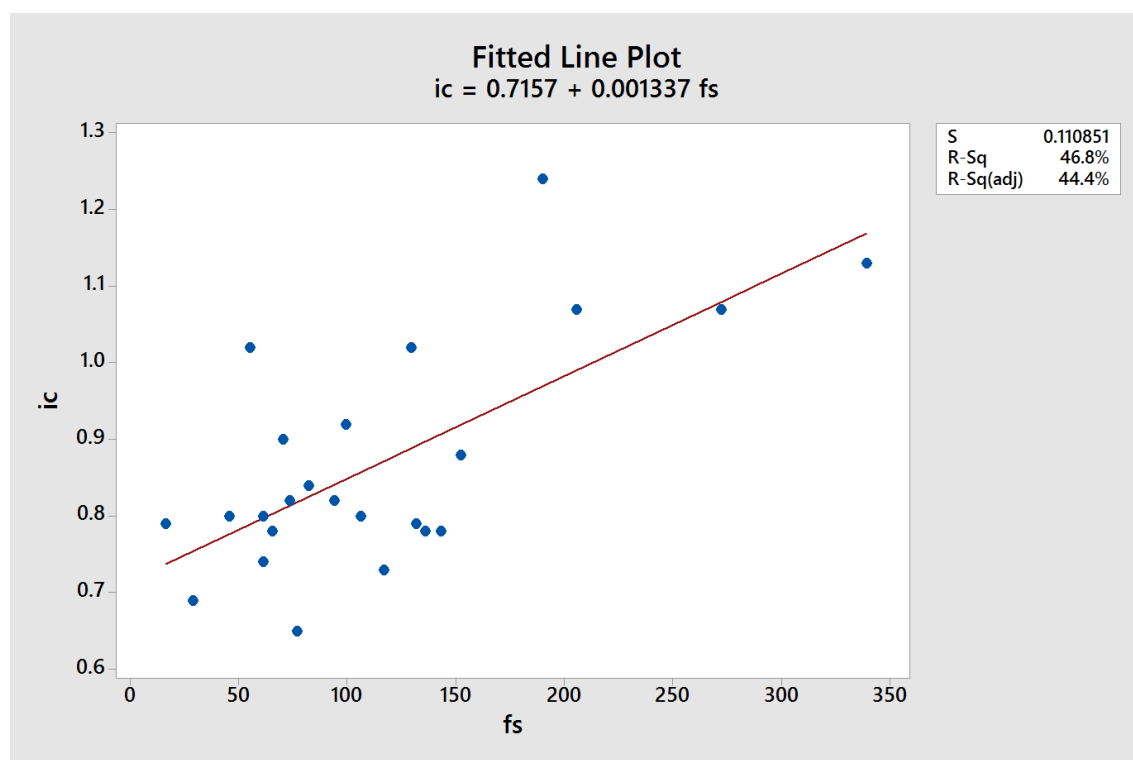
- počet hodnot:  $n = 9$
- Pearsonův korelační koeficient:  $\rho = 0,426$
- p - value = 0,253

Je zřejmé, že i když je korelační koeficient  $\rho = 0,426$ , při takto malém počtu hodnot je tento soubor málo průkazný, což naznačuje i hodnota p - value. Následující výpočetní vztah byl i přesto použit pro výpočet totální soudržnosti ve vrstvách č. 2 a 3.

$$c_u = 53,34 + 3,999 \cdot q_c$$

Výpočet sedání dle Masopusta však vychází z hodnot stupně konzistence  $I_C$ , byla tedy sestavena korelace i pro tuto veličinu. Obdobně jako u předchozí korelace, byla přímo vybrána závislost  $I_C$  na  $f_s$ , stejně jako u hledání závislosti pro neogenní jíl. Na obr. 5.5 je tato zjištěná závislost zobrazena, a s ní graficky zobrazen soubor dat, ze kterého je pro tento vztah vycházeno. Vztah pro výpočet  $I_C$  je

$$I_C = 0,7157 + 0,001337 \cdot f_s$$



Obr. 5.5: Korelace pro  $I_C$  závislé na  $q_c$  pro kvarterní hlíny.

Statistická analýza tohoto souboru dat:

- počet hodnot:  $n = 24$
- Pearsonův korelační koeficient:  $\rho = 0,684$
- $p$  - value = 0,000

Z těchto údajů je možné předpokládat výše uvedený vztah pro výpočet  $I_C$  u kvarterní hlíny jako přesný a vystihující tuto vlastnost zeminy. Výpočet  $c_u$  a  $I_C$  pro vrstvy č. 2 a 3 je uveden v tab. 5.6.

Tab. 5.6: Tabulka korelovaných hodnot pro kvarterní hlínu

		Průměrné hodnoty		Hodnoty ze získaných vztahů	
Vrstva a typ zeminy	od - do	$q_c$ [MPa]	$f_s$ [kPa]	$c_u$ [kPa]	$I_C$
1. VRSTVA	0 m	9,86	64,00	-	-
navážka	0,4 m				
2. VRSTVA	0,4 m	2,40	83,50	62,9	0,83
jílovitá hlína, tuhá	2,6 m				
3. VRSTVA	2,6 m	2,51	99,30	63,4	0,85
jíl, tuhý až pevný	6,4 m				
4. VRSTVA	6,4 m	3,17	135,60	-	-
jíl, pevný	8,2 m				
5. VRSTVA	8,2 m	4,33	159,21	-	-
jíl, pevný	11,8 m				
6. VRSTVA	11,8 m	5,84	197,13	-	-
jíl, pevný až tvrdý	16,4 m				
7. VRSTVA	16,4 m	7,19	266,75	-	-
jíl, tvrdý	21 m				



Tab. 5.7: Tabulka hodnot použitých do výpočtu únosnosti a sedání piloty

Vrstva a typ zeminy	od - do	$c_u$ [kPa]	$I_C$
1. VRSTVA	0 m	-	-
navážka	0,4 m		
2. VRSTVA	0,4 m	62,9	0,83
jílovitá hlína, tuhá	2,6 m		
3. VRSTVA	2,6 m	63,4	0,85
jíl, tuhý až pevný	6,4 m		
4. VRSTVA	6,4 m	69,1	1,00
jíl, pevný	8,2 m		
5. VRSTVA	8,2 m	86,2	1,01
jíl, pevný	11,8 m		
6. VRSTVA	11,8 m	108,5	1,01
jíl, pevný až tvrdý	16,4 m		
7. VRSTVA	16,4 m	128,3	1,02
jíl, tvrdý	21 m		

V tab. 5.7 je souhrn hodnot totální soudržnosti a stupně konzistence, z tab. 5.5 a 5.6, použitých pro výpočet piloty. I přes výše publikovanou úvahu při vytváření závislosti u které byl vypuštěn absolutní člen, bylo při sledování výsledných totálních soudržností přistoupeno na vztah  $c_u = 22,38 + 14,74 \cdot q_c$  pro neogenní jíl. Ani vztah  $c_u = 18,0289 \cdot q_c$  nemůžeme jednoznačně zavrhnout, je vhodné jej považovat za jednu z alternativ.

Následný výpočet únosnosti a sedání piloty z parametrů uvedených v tab. 5.7 předložil výsledek výpočtové únosnosti jako

$$R_c = 2617 \text{ kN}$$

a sedání piloty

$$s = 4,2 \text{ mm}$$

## 6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo prozkoumat využití penetračních zkoušek při návrhu pilotových základů. V první části práce byla provedena rešerše dostupných publikací pojednávajících o penetračních zkouškách. Druhá část obsahuje popis možných postupů k výpočtu únosnosti piloty a pro porovnání různých metod i samotné výpočty. První část obsahuje základní údaje, historii penetrací, jejich vývoj, příklady použití a dále publikované vztahy, pro výpočty fyzikálních, mechanických nebo indexových vlastností zemin. Penetrace jsou rozděleny na dva typy. Statické penetrační zkoušky a dynamické penetrační zkoušky. V první, rešerní části je oběma metodám penetrace věnována přibližně stejná pozornost. V další části, která je zaměřená spíše prakticky je však pozornost orientována na statické penetrační zkoušky. Jak již bylo uvedeno, poskytují výhodu v přímo měřených hodnotách plášťového tření. To je pro výpočet únosnosti piloty zásadní. Bylo tedy ustoupeno od výpočtů únosnosti pilot z dynamických penetračních zkoušek. Je však uváděno, že statický odpor  $q_c$  a dynamický odpor  $q_d$  na hrotu jsou si v nesoudržných zeminách rovny. Zejména v soudržných zeminách se projeví tření mezi penetrační sondou a zeminou a výsledky si již nejsou rovny.

Únosnost piloty byla počítána několika způsoby. Byly využity již dříve odvozené vztahy pro výpočet piloty dle modelové podobnosti, kde je zavedena úvaha, že penetrační sonda je zmenšený model piloty. Dále bylo využito softwaru, který byl pro potřeby výpočtu únosnosti piloty ze statické penetrační zkoušky vytvořen. Pro směrodatné porovnání byl proveden i výpočet dle laboratorních zkoušek. Avšak ten bylo nutné upravit o chybějící hodnoty odhadem geotechnika. Posledním krokem a hlavním výstupem bylo vytvoření korelací, které vystihnou změnu pevnostních a popisných vlastností zemin.

Výpočet dle modelové podobnosti, je dle mého názoru správným postupem a dobrou aplikací této úvahy při výpočtu únosnosti piloty. Využívá jak měrného penetračního odporu na hrotu, tak plášťového tření. Tyto hodnoty dále nijak neupravuje, pouze u výpočtu únosnosti paty piloty zavádí průměrný penetrační odpor v určitém intervalu nad a pod patou piloty. Pro výpočet únosnosti na plášti piloty jsou přímo použity hodnoty plášťového tření z penetrační zkoušky. V kapitole 4.1.2 je uvedena možnost výpočtu plášťového tření v soudržných zeminách z hodnoty koheze u těchto zemin. Toto řešení nepovažuji jako přínos pro využití penetračních zkoušek. Při zjišťování totální soudržnosti z penetrační zkoušky již musíme mít provedou korelaci na odhad  $c_u$ . Tím bychom se mohli dopustit násobení chyby vzniklé při odhadu jednotlivých vztahů. Touto metodou však dostáváme přímo výsledky únosnosti piloty. Z postupu výpočtu je i možné vypočítat únosnost pláště a paty piloty odděleně. Jelikož byla tato teorie publikována před zavedením mezních stavů, jsou do výpočtu zahrnuty

stupně bezpečnosti. I když jsou dnes pro některé aplikace v geotechnice stále používány, bylo by vhodné tento vztah modifikovat a zahrnout do něj teorii mezních stavů. Přes tuto nevýhodu však poskytuje konzervativní výsledky únosnosti piloty. Sedání piloty pro tuto metodu nebylo publikováno.

Využití softwaru pro výpočet únosnosti piloty je v dnešní době výpočetní techniky správným krokem. Obecně tyto výpočetní softwary zrychlí a zpřesní návrh stavebních, v našem případě geotechnických konstrukcí. Software, který byl v této práci použit, je modul Pilota CPT z balíku geotechnického softwaru GEO5 od firmy Fine spol. s r.o. Výpočetní software umožňuje s minimálními zásahy uživatele získat únosnost a sedání piloty. Po prostudování tohoto softwaru bylo zjištěno, že obsahuje několik typů výpočtu, které je možné si uživatelsky volit. Nastínění fungování softwaru bylo popsáno v kapitole 4.1.3. Důležité je však zmínit, že všechny typy výpočtů se od sebe liší a někdy dosti významně. Je to způsobeno především jiným přístupem k výpočtu průměrného penetračního odporu v okolí paty piloty. Dále do výpočtů vstupují součinitele únosnosti paty a pláště piloty. Ty jsou pro každý typ výpočtu jiné a řídí se různými parametry. Nejčastěji však typem zeminy, který je v tomto softwaru odhadnut na základě Robertsona a jeho SBT zatřídění z roku 2010. Další nevýhodu jsem shledal v zanedbání plášťového tření pro výpočet únosnost pláště piloty, používá ho pouze typ výpočtu Schmertmann. V ostatních výpočtech je užito pouze hodnot totální koheze, které se upravují již zmíněnými součiniteli únosnosti. Tato skutečnost jistě zadává na nepřesnosti v zjištěné únosnosti piloty. Pro zatřídění zeminy dle SBT je však plášťové tření vyžadováno. Tento software nabízí i výpočet sedání piloty. Výpočet sednutí je však proveden z poměru zatěžovací síly a únosnosti piloty. Přesně je použito zvlášť zatížení na plášť podělené únosností pláště, obdobně u paty piloty. Z těchto poměrů se vypočte sedání piloty. Jak si můžeme všimnout, je to dosti nepřesné řešení, které predikuje pro málo únosné piloty velká sedání, což však není vždy pravda. Nepoužívání plášťového tření a výpočet sedání jsem vyhodnotil jako dva zásadní problémy použití metod výpočtu, které nabízí tento software.

Pro zjištění, zda všechny postupy jsou správné jsem se pokusil vypočítat únosnost piloty i dle laboratorních zkoušek. Tento krok však nemohl být proveden tak, jak bylo v úmyslu. Laboratorní zkoušky byly provedeny, ale ne pro všechny vrstvy obsažené ve vrtu, který s penetrační sondou tvoří pár. Zejména pro horní vrstvy nebyly laboratorní zkoušky provedeny. Při zkoumání geotechnické interpretace penetrační sondy byl zjištěn odhad totální soudržnosti a stupně konzistence provedený geotechnikem. Srovnání tohoto odhadu a provedených laboratorních zkoušek dal podnět k doplnění parametrů pro výpočet piloty právě z této geotechnické interpretace penetrační sondy. Pro vrstvy, kde byla provedena laboratorní zkouška jsou ponechány právě tyto hodnoty, k vrstvám bez laboratorních zkoušek jsou přiřazeny

parametry z geotechnické interpretace sondy. Tato metoda by mohla mít uplatnění, avšak pokud by byla dosti přesná některá z jiných zde zkoumaných metod nevidím důvod jí používat. Dle mého názoru vnáší do výpočtů nejistoty v podobě správného odhadu geotechnika, který musí mít načerpány zkušenosti pro tuto analýzu. Dále je to pouze odhad intervalu, ve kterém se může hodnota  $c_u$  případně  $I_C$  pohybovat.

Poslední částí při zkoumání využití penetračních zkoušek pro návrh pilotových základů bylo sestavení korelačních vztahů a následný výpočet únosnosti piloty. Jak bylo uvedeno v kapitole 5, je pro výpočty využita sonda PS402. Rozbor této sondy nastínil průběh vrstev zemin. Pro korelace byl tedy zvolen neogenní jíl a kvarterní hlína. Vrstva kvarterního písčitého jílu byla při výpočtech nahrazena kvarterní hlínou. Tento postup musel být proveden z důvodů nedostupnosti laboratorních zkoušek pro tento typ zeminy, a tím pádem nemožnost sestavit vztahy pro výpočty parametrů těchto typů zemin. Obě zeminy jsou zařazeny do kvartéru a dá se tedy předpokládat, že kvarterní hlína bude mít podobné chování jako kvarterní písčitý jíl. Všechny výsledky a postupy prováděných korelací jsou uvedeny v kapitole 5.1.4. Zde uvedu pouze úvahy a poznatky získané při tvorbě korelací. Prvním a jsem přesvědčen, že i hlavním poznatkem a důležitou součástí tvoření jakýchkoliv korelací je přístup autora. Tuto teorii je možné potvrdit mým přístupem ke korelaci. Konkrétně to lze demonstrovat na případu vyřazení absolutního členu z lineární závislosti. Jako další poznatek bylo zaznamenáno provádění statistické analýzy dat. Ta nám poskytne informace o hodnotách, které jsou odlehle a může být v nich zanesena chyba měření. Tyto hodnoty byly vyřazovány. Při velkém množství dat se tento postup dá provést s dostatečnou bezpečností, avšak u malých souborů dat je třeba dát si pozor na vyřazení velkého množství hodnot. I přes přijatelné hodnoty korelačního koeficientu, který je další sledovanou statistickou veličinou, takto zredukovaný soubor dat a z něj získaný výpočetní vztah nemusí právě díky malému množství dat vykazovat dostatečnou přesnost. Z korelačních vztahů získáváme hodnoty totální soudržnosti a stupně konzistence, je tedy nutné ještě provést výpočet únosnosti a sedání piloty.

Pro výsledné porovnání hodnot návrhové únosnosti pilot byla sestavena z předchozích výpočtů tab. 6.1. Přehledné uspořádání hodnot nám pomůže sledovat různé únosnosti a sedání piloty pro různé typy výpočtů. Typ výpočtu dle modelové podobnosti jsem shledal jako dostatečné přesný, avšak oproti ostatním výpočtům je konzervativní. Může to být užitím stupňů bezpečnosti v posledním kroku výpočtu. Výpočty v softwaru GEO5 Pilota CPT již byl okomentovány. Jak bylo uvedeno výše, že sedání zde závisí především na mezní únosnosti piloty, zde to může vypadat, že tomu tak není. Větší hodnota sedání u NEN 6743 je z důvodu menší únosnosti paty piloty vycházející z tohoto typu výpočtu. Velký rozptyl sedání piloty je způsoben velmi nelineárním průběhem křivky pro výpočet sedání. Výpočet dle laboratorních zkoušek s doplněním o odhad geotechnika, bylo po zjištění malé četnosti zkoušek

Tab. 6.1: Porovnání návrhové únosnosti a sedání pilot

typ výpočtu	návrhová únosnost [kN]	sedání [mm]
Modelová podobnost	2069	-
EN 1997 - 2	3629	6,3
NEN 6743	4347	6,8
LCPC (Bustamante)	1928	53,7
Schmertmann	2309	17,3
Laboratorní zkoušky + odhad geotechnika	2708	3,6
Korelace	2617	4,2

bráno pouze jako orientační. Výsledná únosnost mě ale překvapila a pohybuje se na podobné úrovni jako výpočet dle korelací. Sedání piloty je však oproti ostatním metodám menší a přisoudil bych to špatnému odhadu stupně konzistence. Při provádění korelací zřejmě došlo k vyhledání vhodných závislostí, což nám napovídá únosnost vypočítaná na základě této metody. Sedání je opět podobné jako u předchozí metody. Dá se tedy usuzovat, zda by nebylo vhodné provést jiné korelační vztahy, případně získat další data pro korelace.

Zkoumání a analýza výsledků mě přiměla vybrat si a okomentovat pro mě nejlepší výsledky. Při návrhu piloty bych jako první využil typ výpočtu dle Schmertmanna, dále by následovala modelová podobnost a ani korelační vztahy bych neopomíjel. První dva typy výpočtu jsou mi blízké používáním plášťového tření přímo měřeného při penetrační zkoušce. K využití výpočtu piloty dle modelové podobnosti přispívá i skutečnost, která tuto metodu potvrdila na základě zatěžovacích zkoušek pilot, provedených v 80. letech 20. století. Korelace pro určité lokality jsou vhodné k vystihnutí specifického chování zemin, které se tabulkami vysledovat nedá.

Korelace jsou však specifický problém. Pro další získávání výpočetních vztahů bych volil cílený průzkum, který bude sledovat potřeby korelací. Především je vhodné provést laboratorní zkoušky na všech zeminách, které se vyskytují v provedeném vrtu. Dále by bylo vhodné penetrační sondu a vrt provádět v těsné blízkosti, z důvodu eliminace rozdílné mocnosti vrstev. V této práci nebyl zahrnut vliv podzemní vody. Na tuto problematiku je vhodné se zaměřit v dalším rozvíjení využití penetračních zkoušek.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

MASOPUST, Jan. *Speciální zakládání staveb*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 2 sv. (141, 150 s.). ISBN 80-214-2770-1.

MASOPUST, Jan. *Vrtané piloty*. Praha: Čeněk a Ježek, 1994, 263 s. ISBN 8023827553.

MASOPUST, Jan. *Navrhování základových a pažicích konstrukcí: příručka k ČSN EN 1997*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2012. ISBN 9788087438312.

MATYS, Mirko, Ondrej ŤAVODA a Milan CUNINKA. *Polné skúšky zemín*. Bratislava: Alfa, 1990, 303 s. Edícia stavebníckej literatúry (Alfa). ISBN 80-050-0647-0.

ROBERTSON, P. K. *Interpretation of cone penetration tests — a unified approach*. Canadian Geotechnical Journal. 2009, **46**(11), 1337-1355. DOI: 10.1139/T09-065. ISSN 0008-3674.

Dostupné z: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/T09-065>

ROBERTSON, P.K., K.L. CABAL. *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. 6. vyd. Signal Hill: Gregg Drilling & Testing, Inc., 2015. Dostupné z: <http://www.greggdrilling.com/technical-guides>

WEIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 186 s. ISBN 978-80-7204-507-5.

TKP KAPITOLA 16. *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací: Kapitola 16 Piloty a podzemní stěny*. Praha: Ministerstvo dopravy Odbor silniční infrastruktury, 2010. Dostupné z: [http://www.pjpk.cz/TKP\\_16.pdf](http://www.pjpk.cz/TKP_16.pdf)

ČSN EN 1997-1. *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 1: Obecná pravidla*. Praha: Český normalizační institut, 2006.

ČSN EN 1997-2. *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

ČSN EN ISO 22476-1. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Terénní zkoušky - Část 1: Statická penetrační zkouška s elektrickým snímáním dat a měřením pórového tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2013.

ČSN EN ISO 22476-2. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Terénní zkoušky - Část 2: Dynamická penetrační zkouška*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

Journal of Materials Science. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2012, **2012**(23). ISBN 0022-2461. ISSN 0022-2461. Dostupné z:  
<http://link.springer.com/article/10.1007/s10853-012-6706-6/fulltext.html>

Keller – speciální zakládání [online]. [cit. 2016-03-26]. Dostupné z:  
<http://www.kellergrundbau.cz/>

PAGANI GEOTECHNICAL EQUIPMENT. *Pagani Geotechnical Equipment - CPT equipment - Cone Penetration Testing* [online]. [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.pagani-geotechnical.com/>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CPT	statické penetrační zkoušky (cone penetration tests)
DCPT	dynamické penetrační zkoušky (dynamic cone penetration tests)
SPT	standartní penetrační zkoušky (standart penetration tests)
ISSMGE	International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
$q_c$	měrný penetrační odpor
$Q_c$	celkový odpor na hrotu
$A_c$	průřezová plocha hrotu
$f_s$	měrné plášťové tření
$Q_s$	odpor působící na třecí manžetu
$A_s$	plocha třecí manžety
$I_D$	relativní ulehlost
$I_C$	stupeň konzistence
$c_u$	totální soudržnost (koheze) zeminy
$c_{ef}$	efektivní soudržnost (koheze) zeminy
$\varphi_u$	totální úhel vnitřního tření zeminy
$\varphi_{ef}$	efektivní úhel vnitřního tření zeminy
$q_d$	dynamický penetrační odpor
$m$	hmotnost beranu
$m^l$	celková hmotnost penetračního soutyčí, kovadliny a vodících tyčí
$h$	výška pádu beranu
$A$	plocha kužele na základně
$e$	průměrná penetrace na jeden úder



---

$N_{10}$	počet úderů na vnik o 10 cm
$E$	energie pádu beranu
$m$	hmotnost beranu
$g$	gravitační zrychlení
$h$	výška pádu beranu
$q_p$	průměrný penetrační odpor
$f_1$	součinitel modelové podobnosti
$A_p$	plocha paty piloty
$U_u$	mezní únosnost piloty
$U_{bu}$	mezní únosnost paty piloty
$U_{fu}$	mezní únosnost pláště piloty
$U_{vd}$	výpočtová únosnost piloty
$d$	průměr piloty
$q_{cp}$	průměrný penetrační odpor v úrovni paty piloty
$h_i$	tloušťka i-té vrstvy
$f_{si}$	plášťové tření z penetrační zkoušky v i-té vrstvě
$m$	součinitel vlivu technologie provádění piloty
$F$	součinitel bezpečnosti
$f_s$	tření na plášti
$\beta$	součinitel vlivu konzistence
$q_t$	opravená hodnota penetračního odporu
$R_f$	třecí poměr (friction ratio)
$\gamma$	objemová tíha zeminy

$\gamma_w$	objemová tíha vody
$u_2$	pórový tlak
$a$	koeficient penetrometru
$\alpha$	koeficient penetrometru
$p_a$	atmosférický tlak
$n$	počet hodnot
$V(x)$	variační koeficient
$\rho$	Pearsonův korelační koeficient

## SEZNAM PŘÍLOH

A	Záznam dat ze statické penetrační zkoušky - sonda PS402	61
B	Geotechnická interpretace penetrační sondy	62
C	Protokol GEO5 modul Pilota CPT	63
D	Protokol GEO5 modul Pilota	68

## A ZÁZNAM DAT ZE STATICKÉ PENETRAČNÍ ZKOUŠKY - SONDA PS402

h	$q_c$	$f_s$	h	$q_c$	$f_s$	h	$q_c$	$f_s$
0.2	13.14	0	7.2	3.24	137	14.2	5.42	212
0.4	6.58	128	7.4	3.12	161	14.4	5.54	211
0.6	2.94	167	7.6	2.9	153	14.6	7.26	215
0.8	3	57	7.8	3.12	139	14.8	6.78	229
1	2.06	116	8	3.48	159	15	5.78	272
1.2	1.32	123	8.2	3.9	125	15.2	7	257
1.4	2.02	76	8.4	3.7	5	15.4	7.6	237
1.6	1.66	65	8.6	3.52	172	15.6	5.88	195
1.8	1.5	65	8.8	3.98	149	15.8	5.78	209
2	1.42	45	9	3.52	171	16	5.22	219
2.2	1.72	49	9.2	4.1	161	16.2	5.38	217
2.4	2.02	60	9.4	4.38	133	16.4	5.78	212
2.6	2.5	51	9.6	4.02	200	16.6	7.18	208
2.8	1.7	116	9.8	4.2	164	16.8	5.38	183
3	1.72	121	10	4.46	192	17	7.18	185
3.2	1.92	88	10.2	4.26	151	17.2	5.36	225
3.4	2.12	88	10.4	4.82	129	17.4	6.32	219
3.6	2.14	84	10.6	5.7	67	17.6	6.08	272
3.8	2.16	83	10.8	4.3	169	17.8	6.08	325
4	2.3	85	11	4.28	189	18	7.86	320
4.2	2.44	93	11.2	4.7	233	18.2	6.86	296
4.4	2.62	97	11.4	5.08	227	18.4	7.28	336
4.6	2.84	109	11.6	4.86	169	18.6	6.88	285
4.8	2.68	108	11.8	4.46	219	18.8	6.62	308
5	2.8	116	12	6.3	216	19	8.48	249
5.2	2.78	108	12.2	5.16	161	19.2	10.22	203
5.4	2.76	115	12.4	4.8	151	19.4	5.68	344
5.6	2.8	113	12.6	5.12	204	19.6	6.52	280
5.8	3	108	12.8	6.08	171	19.8	10.32	193
6	2.98	107	13	5.46	217	20	7.28	305
6.2	3.12	104	13.2	6.14	145	20.2	8.38	324
6.4	2.84	92	13.4	5.76	171	20.4	7.2	221
6.6	2.88	119	13.6	5.3	137	20.6	7.06	363
6.8	2.98	139	13.8	5.44	137	20.8	8.34	265
7	3.22	132	14	6.82	117	21	8.18	281

# B GEOTECHNICKÁ INTERPRETACE PENE- TRAČNÍ SONDY

GEOtest Brno, a.s.				Geotechnická interpretace sondy				Objekt <b>PS402</b>	
Hloubka [m]	Stratigraf. členění	Geologický profil	Podzemní voda	Popis poloh	Ic	Id	Eoed	Cu	Fef
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1		A12		0.00-0.40 : naváka - jílovitá hlina se těrkem, tvrdá (středně ulehá)	(>1,3)	(0,60)	-	-	-
2		Q11		0.40-2.60 : jílovitá hlina, tuhá	0,72-0,87	-	4,8-5,8	40-60	(22)
3				2.60-6.40 : jíl, tuhý až pevný	0,91-1,12	-	8,8-10	80-95	(24)
4		Q41		6.40-8.20 : jíl, pevný	1,11-1,13	-	10,6-13	90-100	(18)
5				8.20-11.80 : jíl, pevný	1,10-1,14	-	12-15	100-120	(18)
6				11.80-16.40 : jíl, pevný až tvrdý	1,18-1,26	-	15-18	140-160	(18)
7				16.40-21.00 : jíl, tvrdý	>1,3	-	20-23	180-200	(18)
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14			N11						
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									

POPISNÁ DATA

Vrtná souprava : GOUDA Holland  
Vrtmistr : Ing. Herrmann

POZNÁMKA

Hladina podzemní vody neměřena.

Měřítko : 1 : 100  
Projekt : 04 7054  
Zpracoval : Ing. D. Rupp  
Datum : 16.8.2005  
Příloha : 9.118

# C PROTOKOL GEO5 MODUL PILOTA CPT

Pavel Koudela

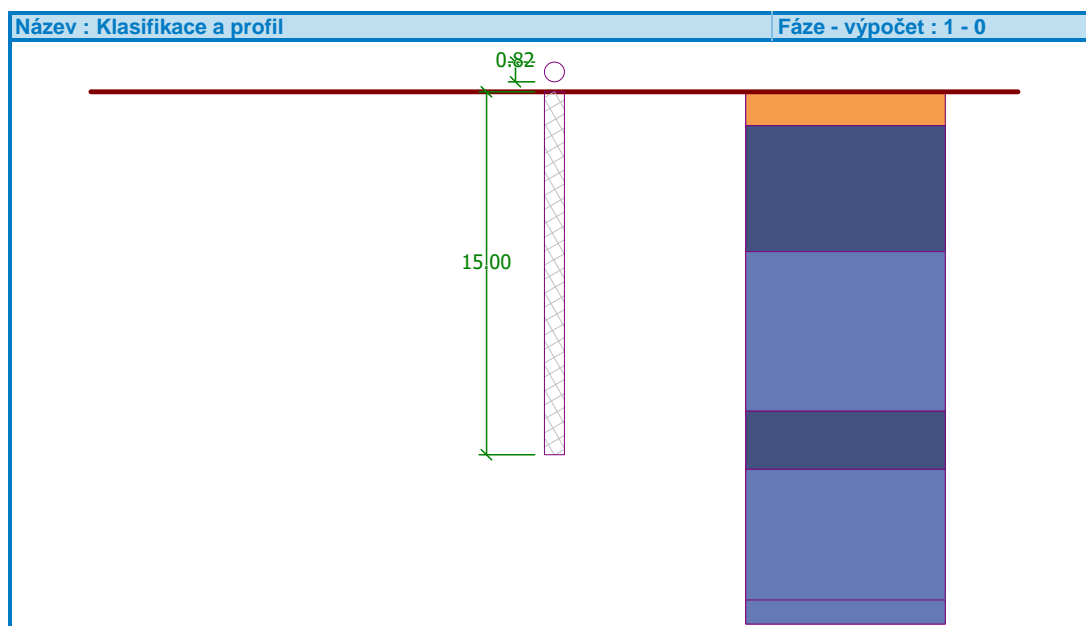
Využití penetračních zkoušek při návrhu pilotových základů

## Výpočet Piloty CPT

### Vstupní data

#### Projekt

Akce : Využití penetračních zkoušek při návrhu pilotových základů  
 Popis : bakalářská práce  
 Vypracoval : Pavel Koudela  
 Datum : 2. 4. 2016



#### Nastavení

(zadané pro aktuální úlohu)

#### Piloty CPT

Metodika posouzení : EN 1997-2

Typ výpočtu : EN 1997-2

Součinitele redukce odporu (R)			
Součinitel redukce odporu na patě :	$\gamma_b =$	1.00	[-]
Součinitel redukce odporu na plášti :	$\gamma_s =$	1.00	[-]
Součinitele redukce			
Součinitel redukce mezní zatěž. křivky :	$k =$	1.00	[-]

#### Klasifikace zemin

Zkouška pro zatřídění : 127142\_PENETRACE\_SP402

Zatřídění : Robertson 2010

Koeficient penetrometru  $\alpha = 0.80$ 

#### Zatříděné zeminy

Číslo	Název
1	Jíly - hlinitý jíl, jíl



Pouze pro nekomerční využití






1

Pavel Koudela	Využití penetračních zkoušek při návrhu pilotových základů
---------------	--

Číslo	Název
2	Hlinitá směs - jílovitá hlína, hlinitý jíl
3	Štěrkopísek, ulehlý písek

#### Základní parametry zemin

Číslo	Název	Vzorek	$\varphi_{ef}$ [°]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{su}$ [kN/m <sup>3</sup> ]
1	Jíly - hlinitý jíl, jíl		20.00	19.71	9.71
2	Hlinitá směs - jílovitá hlína, hlinitý jíl		23.00	18.90	8.90
3	Štěrkopísek, ulehlý písek		34.00	18.88	8.88

#### Parametry zemin

##### Jíly - hlinitý jíl, jíl

Objemová tíha :  $\gamma = 19.71 \text{ kN/m}^3$   
Úhel vnitřního tření :  $\varphi_{ef} = 20.00^\circ$   
Obj.tíha sat.zeminy :  $\gamma_{sat} = 19.71 \text{ kN/m}^3$   
Typ zeminy : jíl

##### Hlinitá směs - jílovitá hlína, hlinitý jíl

Objemová tíha :  $\gamma = 18.90 \text{ kN/m}^3$   
Úhel vnitřního tření :  $\varphi_{ef} = 23.00^\circ$   
Obj.tíha sat.zeminy :  $\gamma_{sat} = 18.90 \text{ kN/m}^3$   
Typ zeminy : jíl

##### Štěrkopísek, ulehlý písek

Objemová tíha :  $\gamma = 18.88 \text{ kN/m}^3$   
Úhel vnitřního tření :  $\varphi_{ef} = 34.00^\circ$   
Obj.tíha sat.zeminy :  $\gamma_{sat} = 18.88 \text{ kN/m}^3$   
Typ zeminy : písek, štěrk  
Velikost OCR :  $OCR \leq 2$   
Typ zrn : písek menší než 600 nm

#### Konstrukce

Typ konstrukce : osamělá pilota

Návrhové zatížení  $F_{sd} = 2000.00 \text{ kN}$

Užitné zatížení  $F_s = 1500.00 \text{ kN}$

#### Geometrie

Typ piloty : vrtané pažené ocel. výpažnicí

Materiál piloty : beton

Délka piloty v zemině = 15.00 m

Vysazení hlavy piloty nad terén = 0.00 m

Hloubka upraveného terénu = 0.00 m

#### Průřez piloty - kruhová

Průměr piloty  $d = 0.82 \text{ m}$

#### Celkové nastavení výpočtu

Ve výpočtu není uvážován vliv negativního plášťového tření.



Pouze pro nekomerční využití



Pavel Koudela	Využití penetračních zkoušek při návrhu pilotových základů
---------------	--

Součinitel neurčitosti modelu  $\gamma_{cal} = 1.00$

#### Geologický profil a přiřazení zemin

Číslo	Vrstva [m]	Přiřazená zemina	Vzorek
1	1.40	Štěrkopísek, ulehlý písek	
2	5.20	Hlinitá směs - jílovitá hlína, hlinitý jíl	
3	6.60	Jíly - hlinitý jíl, jíl	
4	2.40	Hlinitá směs - jílovitá hlína, hlinitý jíl	
5	5.40	Jíly - hlinitý jíl, jíl	
6	-	Jíly - hlinitý jíl, jíl	

#### Výpočet únosnosti - EN 1997-2

##### Výpočet svislé únosnosti piloty - mezivýsledky zkoušek

###### Mezivýsledky CPT - 127142\_PENETRACE\_SP402

Celková únosnost	$R_{c,i}$	= 5079.92 kN
Únosnost na plášti	$R_{s,i}$	= 3721.70 kN
Únosnost na patě	$R_{b,i}$	= 1358.22 kN
Střední velikost penetračního odporu	$q_{cl,mean}$	= 6.09 MPa
Střední velikost penetračního odporu	$q_{cII,mean}$	= 5.28 MPa
Střední velikost penetračního odporu	$q_{cIII,mean}$	= 4.60 MPa
Maximální napětí na patě piloty	$p_{r,max,point}$	= 2571.89 kPa
Redukované napětí na patě piloty	$p_{r,max,point,red}$	= 2571.89 kPa

##### Výpočet svislé únosnosti piloty - mezivýsledky pláště

###### Mezivýsledky CPT - 127142\_PENETRACE\_SP402

Číslo	Hloubka [m]	$q_{cz}$ [MPa]	Souč. [-]	Plášť. tření [kPa]
1	0.00	0.00	0.0050	0.00
2	0.03	2.00	0.0050	10.00
3	0.20	13.14	0.0050	65.70
4	0.40	6.58	0.0050	32.90
5	0.80	3.00	0.0050	15.00
6	1.00	2.06	0.0050	10.30
7	1.02	2.00	0.0050	10.00
8	1.40	2.02	0.0200	40.40
9	1.41	2.00	0.0200	40.00
10	1.60	1.66	0.0200	33.20
11	1.80	1.50	0.0200	30.00
12	2.20	1.72	0.0200	34.40
13	2.39	2.00	0.0200	40.00
14	2.40	2.02	0.0200	40.40
15	2.60	2.50	0.0200	50.00



Pouze pro nekomerční využití





Číslo	Hloubka [m]	$q_{cz}$ [MPa]	Souč. [-]	Plášť. tření [kPa]
16	2.73	2.00	0.0200	40.00
17	3.00	1.72	0.0200	34.40
18	3.20	1.92	0.0200	38.40
19	3.28	2.00	0.0200	40.00
20	3.40	2.12	0.0200	42.40
21	3.60	2.14	0.0200	42.80
22	3.80	2.16	0.0200	43.20
23	4.00	2.30	0.0200	46.00
24	4.10	2.37	0.0200	47.40
25	4.20	2.44	0.0200	48.80
26	4.40	2.62	0.0200	52.40
27	4.60	2.84	0.0200	56.80
28	5.00	2.80	0.0200	56.00
29	5.20	2.78	0.0200	55.60
30	5.60	2.80	0.0200	56.00
31	5.80	3.00	0.0200	60.00
32	6.20	3.12	0.0300	93.60
33	6.60	2.88	0.0200	57.60
34	6.80	2.98	0.0200	59.60
35	7.00	3.22	0.0300	96.60
36	7.20	3.24	0.0300	97.20
37	7.40	3.12	0.0300	93.60
38	7.80	3.12	0.0300	93.60
39	8.00	3.48	0.0300	104.40
40	8.20	3.90	0.0300	117.00
41	8.40	3.70	0.0300	111.00
42	8.44	3.66	0.0300	109.92
43	8.80	3.98	0.0300	119.40
44	9.20	4.10	0.0300	123.00
45	9.40	4.38	0.0300	131.40
46	9.80	4.20	0.0300	126.00
47	10.00	4.46	0.0300	133.80
48	10.40	4.82	0.0300	144.60
49	10.60	5.70	0.0300	171.00
50	10.80	4.30	0.0300	129.00
51	11.20	4.70	0.0300	141.00
52	11.40	5.08	0.0300	152.40
53	11.60	4.86	0.0300	145.80
54	12.00	6.30	0.0300	189.00
55	12.20	5.16	0.0300	154.80
56	12.60	5.12	0.0300	153.60
57	12.80	6.08	0.0300	182.40
58	13.20	6.14	0.0300	184.20
59	13.40	5.76	0.0300	172.80
60	13.77	5.42	0.0300	162.57
61	13.80	5.44	0.0300	163.20

Číslo	Hloubka [m]	$q_{cz}$ [MPa]	Souč. [-]	Plášť. tření [kPa]
62	14.00	6.82	0.0300	204.60
63	14.40	5.54	0.0300	166.20
64	14.60	7.26	0.0300	217.80
65	14.80	6.78	0.0300	203.40
66	15.00	5.78	0.0300	173.40

**Výpočet svislé únosnosti piloty - mezivýsledky**

Průměr piloty  $d_{eq} = 0.82 \text{ m}$   
 Průměr piloty v patě  $d_{s,eq} = 0.82 \text{ m}$   
 Plocha piloty v patě  $A_b = 0.53 \text{ m}^2$   
 Koef. redukce únosnosti paty  $\alpha_p = 0.50$   
 Koef. vlivu tvaru piloty  $s = 1.00$   
 Koef. vlivu rozšířené paty  $\beta = 1.00$

**Výpočet svislé únosnosti piloty - výsledky**

Výpočet proveden pro: 127142\_PENETRACE\_SP402

Minimální odpor piloty v tlaku  $R_{c,min} = 5079.92 \text{ kN}$   
 Součinitel  $\xi_4 = 1.40$   
 Průměrný odpor piloty v tlaku  $R_{c,mean} = 5079.92 \text{ kN}$   
 Součinitel  $\xi_3 = 1.40$   
 Charakteristická únosnost piloty  $R_c = 3628.51 \text{ kN}$

Návrhová únosnost piloty  $R_{cd} = 3628.51 \text{ kN}$   
 Návrhové zatížení  $F_{s,d} = 2000.00 \text{ kN}$

$R_{cd} = 3628.51 \text{ kN} > F_{s,d} = 2000.00 \text{ kN}$

**Pilota na posouzení únosnosti VYHOVUJE**

**Výpočet sedání - EN 1997-2****Výpočet sednutí:**

Užité zatížení  $F_s = 1500.00 \text{ kN}$   
 Únosnost na plášti  $R_s = 1423.18 \text{ kN}$   
 Únosnost v patě  $R_b = 76.82 \text{ kN}$   
 Sednutí paty piloty  $w_{point} = 5.2 \text{ mm}$   
 Pružná deformace piloty  $w_{el,d} = 1.1 \text{ mm}$   
 Celkové sedání  $w_{1,d} = 6.3 \text{ mm}$

**Výpočet sedání piloty - výsledky**

Pro zatížení  $F_s = 1500.00 \text{ kN}$  je sednutí piloty = 6.3 mm



Pouze pro nekomerční využití



# D PROTOKOL GEO5 MODUL PILOTA

Pavel Koudela

Využití penetračních zkoušek při návrhu pilotových základů

## Posouzení piloty

### Vstupní data

#### Projekt

Akce : Využití penetračních zkoušek při návrhu pilotových základů  
 Popis : bakalářská práce  
 Vypracoval : Pavel Koudela  
 Datum : 2. 4. 2016

#### Nastavení

(zadané pro aktuální úlohu)

#### Materiály a normy

Betonové konstrukce : EN 1992-1-1 (EC2)  
 Součinitele EN 1992-1-1 : standardní

#### Piloty








Výpočet pro neodvodněné podmínky : Tomlinson  
 Zatěžovací křivka : nelineární (Masopust)  
 Vodorovná únosnost : pružný poloprostor  
 Metodika posouzení : výpočet podle EN1997  
 Návrhový přístup : 2 - redukce zatížení a odporu

Součinitele redukce zatížení (F)			
Trvalá návrhová situace			
		Nepříznivé	Příznivé
Stálé zatížení :	$\gamma_G =$	1.35 [-]	1.00 [-]

Součinitele redukce odporu (R)			
Trvalá návrhová situace			
Součinitel redukce odporu na plášti :	$\gamma_s =$	1.10 [-]	
Součinitel redukce odporu na patě :	$\gamma_b =$	1.10 [-]	
Součinitel redukce únosnosti tažené piloty :	$\gamma_{st} =$	1.15 [-]	

#### Základní parametry zemín

Číslo	Název	Vzorek	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ [-]
1	1 - navážka		20.00	0.40
2	2 - jílovitá hlína, tuhá		21.00	0.40
3	3 - jíl, tuhý až pevný		21.00	0.40
4	4 - jíl, pevný		21.00	0.40
5	5 - jíl, pevný		21.00	0.40
6	6 - jíl. pevný až tvrdý		21.00	0.40
7	7 - jíl, tvrdý		21.00	0.40








Pro výpočet tlaku v klidu jsou všechny zeminy zadány jako nesoudržné.










Pouze pro nekomerční využití



1

Číslo	Název	Vzorek	$E_{oed}$ [MPa]	$E_{def}$ [MPa]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	n [-]
1	1 - navážka		4.00	-	20.00	-	-
2	2 - jílovitá hlína, tuhá		5.30	-	21.00	-	-
3	3 - jíl, tuhý až pevný		9.40	-	21.00	-	-
4	4 - jíl, pevný		11.80	-	21.00	-	-
5	5 - jíl, pevný		11.00	-	21.00	-	-
6	6 - jíl. pevný až tvrdý		16.00	-	21.00	-	-
7	7 - jíl, tvrdý		21.00	-	21.00	-	-

Číslo	Název	Vzorek	$c_u$ [kPa]	$\alpha$ [-]
1	1 - navážka		50.00	-
2	2 - jílovitá hlína, tuhá		50.00	-
3	3 - jíl, tuhý až pevný		87.00	-
4	4 - jíl, pevný		95.00	-
5	5 - jíl, pevný		56.00	-
6	6 - jíl. pevný až tvrdý		159.00	-
7	7 - jíl, tvrdý		146.00	-

#### Parametry zemín

##### 1 - navážka

Objemová tíha :  $\gamma = 20.00 \text{ kN/m}^3$   
 Poissonovo číslo :  $\nu = 0.40$   
 Edometrický modul :  $E_{oed} = 4.00 \text{ MPa}$   
 Obj.tíha sat.zeminy :  $\gamma_{sat} = 20.00 \text{ kN/m}^3$   
 Soudržnost zeminy :  $c_u = 50.00 \text{ kPa}$

##### 2 - jílovitá hlína, tuhá

Objemová tíha :  $\gamma = 21.00 \text{ kN/m}^3$   
 Poissonovo číslo :  $\nu = 0.40$   
 Edometrický modul :  $E_{oed} = 5.30 \text{ MPa}$   
 Obj.tíha sat.zeminy :  $\gamma_{sat} = 21.00 \text{ kN/m}^3$   
 Soudržnost zeminy :  $c_u = 50.00 \text{ kPa}$

**3 - jíl, tuhý až pevný**

Objemová tíha :	$\gamma$ = 21.00 kN/m <sup>3</sup>
Poissonovo číslo :	$\nu$ = 0.40
Edometrický modul :	$E_{\text{oed}}$ = 9.40 MPa
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{\text{sat}}$ = 21.00 kN/m <sup>3</sup>
Soudržnost zeminy :	$c_u$ = 87.00 kPa

**4 - jíl, pevný**

Objemová tíha :	$\gamma$ = 21.00 kN/m <sup>3</sup>
Poissonovo číslo :	$\nu$ = 0.40
Edometrický modul :	$E_{\text{oed}}$ = 11.80 MPa
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{\text{sat}}$ = 21.00 kN/m <sup>3</sup>
Soudržnost zeminy :	$c_u$ = 95.00 kPa

**5 - jíl, pevný**

Objemová tíha :	$\gamma$ = 21.00 kN/m <sup>3</sup>
Poissonovo číslo :	$\nu$ = 0.40
Edometrický modul :	$E_{\text{oed}}$ = 11.00 MPa
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{\text{sat}}$ = 21.00 kN/m <sup>3</sup>
Soudržnost zeminy :	$c_u$ = 56.00 kPa

**6 - jíl, pevný až tvrdý**

Objemová tíha :	$\gamma$ = 21.00 kN/m <sup>3</sup>
Poissonovo číslo :	$\nu$ = 0.40
Edometrický modul :	$E_{\text{oed}}$ = 16.00 MPa
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{\text{sat}}$ = 21.00 kN/m <sup>3</sup>
Soudržnost zeminy :	$c_u$ = 159.00 kPa

**7 - jíl, tvrdý**

Objemová tíha :	$\gamma$ = 21.00 kN/m <sup>3</sup>
Poissonovo číslo :	$\nu$ = 0.40
Edometrický modul :	$E_{\text{oed}}$ = 21.00 MPa
Obj.tíha sat.zeminy :	$\gamma_{\text{sat}}$ = 21.00 kN/m <sup>3</sup>
Soudržnost zeminy :	$c_u$ = 146.00 kPa

**Geometrie**

Profil piloty: kruhová

**Rozměry**Průměr  $d$  = 0.82 mDélka  $l$  = 15.00 m**Umístění**Vysazení  $h$  = 0.00 mHloubka upraveného terénu  $h_z$  = 0.00 m

Typ technologie: Vrtané piloty

**Geologický profil a přiřazení zemin**




Číslo	Vrstva [m]	Přiřazená zemina	Vzorek
1	0.40	1 - navážka	



Pouze pro nekomerční využití



Pavel Koudela	Využití penetračních zkoušek při návrhu pilotových základů
---------------	--

Číslo	Vrstva [m]	Přiřazená zemina	Vzorek
2	2.20	2 - jílovitá hlína, tuhá	
3	3.80	3 - jíl, tuhý až pevný	
4	1.80	4 - jíl, pevný	
5	3.60	5 - jíl, pevný	
6	4.60	6 - jíl. pevný až tvrdý	
7	4.60	7 - jíl, tvrdý	
8	-	7 - jíl, tvrdý	

#### Zatížení

Číslo	Zatížení nové změna	Název	Typ	N [kN]	M <sub>x</sub> [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	H <sub>x</sub> [kN]	H <sub>y</sub> [kN]
1	Ano	Zatížení č. 1	Návrhové	2000.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Ano	Zatížení č. 1 - provozní	Užitné	1500.00	0.00	0.00	0.00	0.00

#### Celkové nastavení výpočtu

Výpočet svislé únosnosti : analytické řešení

Typ výpočtu : výpočet pro neodvodněné podmínky

#### Nastavení výpočtu fáze

Návrhová situace : trvalá

Metodika posouzení : bez redukce vstupních dat

#### Posouzení čís. 1

##### Posouzení svislé únosnosti piloty, metoda Tomlinson - mezivýsledky

Výpočet únosnosti v patě:

Návrhová neodvodněná smyková pevnost  $c_u = 159.00$  kPa

Plocha příčného řezu piloty  $A_p = 5.28E-01$  m<sup>2</sup>

Únosnost na plášti piloty:

Hloubka [m]	Mocnost [m]	$c_{ud}$ [kPa]	$\alpha$ [-]	$R_{si}$ [kN]
0.40	0.40	50.00	0.97	45.48
2.60	2.20	50.00	0.97	250.15
6.40	3.80	87.00	0.80	619.69
8.20	1.80	95.00	0.75	299.42
11.80	3.60	56.00	0.93	440.70
15.00	3.20	159.00	0.31	365.33

##### Posouzení svislé únosnosti : Tomlinson

Výpočet proveden s automatickým výběrem nejnejpříznivějších zatěžovacích stavů.

!	Pouze pro nekomerční využití	!
4		

Posouzení tlačené piloty:

Nejnepříznivější zatěžovací stav číslo 1. (Zatížení č. 1)

Únosnost piloty na plášti  $R_s = 2020.77$  kN

Únosnost piloty v patě  $R_b = 687.01$  kN

Únosnost piloty  $R_c = 2707.78$  kN

Extrémní svislá síla  $V_d = 2000.00$  kN

$$R_c = 2707.78 \text{ kN} > 2000.00 \text{ kN} = V_d$$

**Svislá únosnost piloty VYHOVUJE**

### Posouzení čís. 1

#### Výpočet zatěžovací křivky piloty - vstupní data

Vrstva číslo	Počátek [m]	Konec [m]	Mocnost [m]	$E_s$ [MPa]	Součinitel a	Součinitel b
1	0.00	0.40	0.40	0.10	46.00	20.00
2	0.40	2.60	2.20	11.00	76.00	71.00
3	2.60	6.40	3.80	30.07	97.00	108.00
4	6.40	8.20	1.80	39.65	97.00	108.00
5	8.20	11.80	3.60	45.32	97.00	108.00
6	11.80	15.00	3.20	48.15	97.00	108.00

Uvažovat zatížení : užité

Součinitel vlivu ochrany dřívku  $m_2 = 1.00$

Limitní sedání piloty  $s_{lim} = 25.0$  mm

Regresní součinitel  $e = 988.00$

Regresní součinitel  $f = 1084.00$

#### Výpočet zatěžovací křivky piloty - mezivýsledek

Mezní síla na plášti piloty  $R_{sy} = 2046.64$  kN

Velikost napětí na patě při  $R_{sy}$   $q_0 = 928.74$  kPa

Průměrné plášťové tření  $q_s = 75.66$  kPa

Průměrný sečnový modul deformace  $E_s = 35.14$  MPa

Součinitel přenosu zatížení do paty  $\beta = 0.14$

Příčinkové součinitele sedání :

Základní - závislý na poměru  $l/d$   $l_0 = 0.09$

Součinitel vlivu tuhosti piloty  $R_k = 1.21$

Součinitel vlivu nestlačitelné vrstvy  $R_h = 1.00$

#### Body zatěžovací křivky

Sednutí [mm]	Zatížení [kN]
0.0	0.00
2.5	1257.78
5.0	1778.77
7.5	2178.54
10.0	2427.00
12.5	2522.09



Pouze pro nekomerční využití



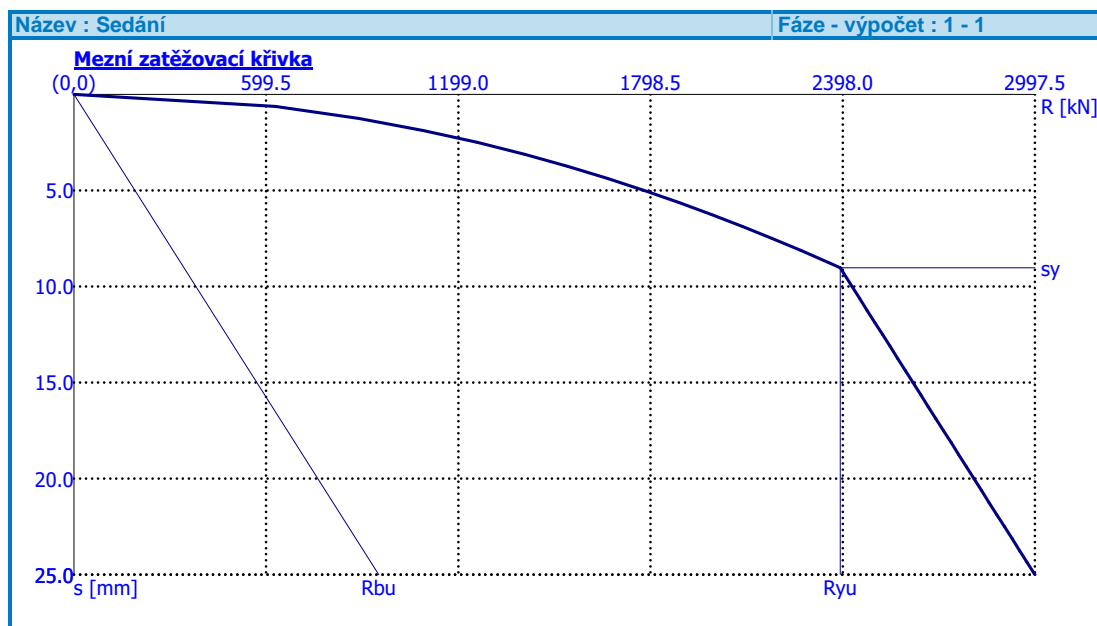
Sednutí [mm]	Zatížení [kN]
15.0	2617.18
17.5	2712.27
20.0	2807.36
22.5	2902.45
25.0	2997.54

**Výpočet zatěžovací křivky piloty - výsledky**

Zatížení na mezi mobilizace plášť.tření  $R_{yu} = 2389.97 \text{ kN}$   
 Velikost sedání odpovídající síle  $R_{yu}$   $s_y = 9.0 \text{ mm}$

Únosnosti odpovídající sednutí 25.0 mm :  
 Únosnost paty  $R_{bu} = 950.90 \text{ kN}$   
 Celková únosnost  $R_c = 2997.54 \text{ kN}$

Pro zatížení  $Q = 1500.00 \text{ kN}$  je sednutí piloty 3.6 mm



Pouze pro nekomerční využití

